INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | EL LADO OSCURO DE LA VÍA LÁCTEA | EVOLUCIÓN DE LAS HISTONAS | MEDICIÓN DEL TIEMPO | DICIEMBRE 2011 N.° 423

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2011 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDICINA
Vacunas contra el cáncer

METROLOGÍA
¿Cambiará la medición del tiempo?

GENÉTICA
Evolución de las histonas

HISTORIA
La conquista científica del Polo Sur

El lado oscuro de la Vía Láctea

La materia oscura podría dar cuenta de las deformaciones que exhibe nuestra galaxia

DOSSIER: AÑO DE LA QUÍMICA

11 Cuestiones moleculares



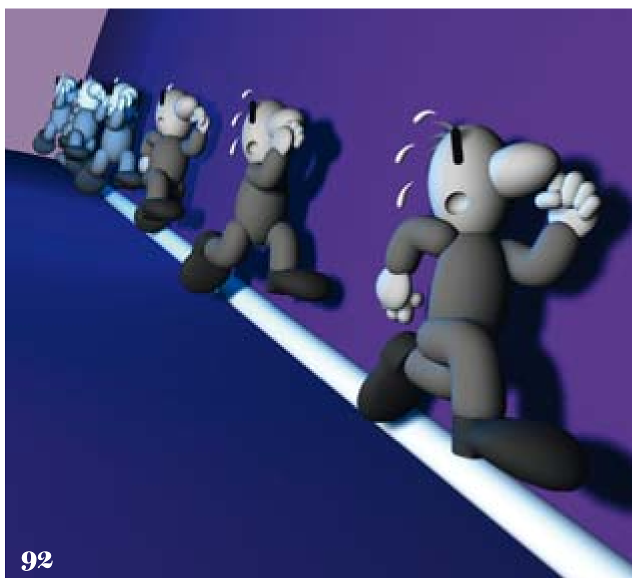
6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Diciembre 2011, Número 423

58


14


44

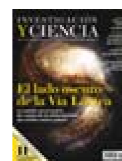

92

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Aunque solemos imaginarlo plano, el disco de nuestra galaxia hace gala de un notable abarquillamiento para el que, hasta hace poco, los astrónomos carecían de explicación. Investigaciones recientes apuntan a que tanto esta como otras particularidades morfológicas de la Vía Láctea y su entorno podrían deberse a la dinámica del gigantesco halo de materia oscura que la rodea. Imagen de Kenn Brown, Mondolithic Studios.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2011

USO DEL CEREBRO

En «Física de la inteligencia» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2011], Douglas Fox observa que la inteligencia humana se encuentra limitada por la capacidad de comunicación entre neuronas, lo que a su vez depende del tamaño de estas. Según Fox, «tal vez la mente humana disponga de mejores métodos para expandirse sin necesidad de recurrir a la evolución», a lo que añade que quizá las interacciones sociales supongan una manera de poner en común la inteligencia propia con la ajena. Sin embargo, el autor olvida señalar que, como especie, aún no hemos aprendido a obtener el máximo rendimiento del cerebro. Una persona normal emplea solo el diez por ciento de las neuronas. ¿No resultaría más provechoso —e inteligente— olvidar las limitaciones físicas del cerebro e idear métodos que fortaleciesen las conexiones neuronales y aumentasen su rendimiento?

Andrea Rothman
Great Neck, Nueva York

Responde Fox: *Se calcula que, en un instante dado, solo entre el 1 y el 15 por ciento de las neuronas se hallan excitadas. Sin embargo, ello no implica que resulte posible activar el resto para aumentar de manera súbita nuestra inteligencia.*

Permitir que la mayoría de las neuronas permanezcan ociosas ha constituido un principio rector en la evolución de nuestro cerebro. Las neuronas en reposo necesitan mucha menos energía que las activas, por lo que disponer de una gran cantidad de células que no se excitan con tanta frecuencia eleva al máximo la relación entre la información procesada y la energía consumida.

Cuantas más neuronas poseamos, mayor resulta el número de trayectos que puede tomar un impulso nervioso. Ello aumenta la cantidad de información que puede transportar una sola señal, por lo que una misma tarea puede llevarse a cabo con un menor número de impulsos y, por tanto, con una menor cantidad de energía. Incluso si ignorásemos todo lo anterior y nos obstináramos en activar cada neurona, aún deberíamos hacer frente al coste energético de esa actividad cerebral, que con facilidad podría duplicar o cuadruplicar la cantidad de calorías requeridas. Por tanto, parece más que probable que nuestro cerebro haya evolucionado hasta maximizar la cantidad de información que maneja por unidad de energía.

EL TAMAÑO DEL UNIVERSO

Desearía entender la afirmación sobre el valor del radio del universo, que el articulo «¿Existe el multiverso?» de George Ellis [Investigación y Ciencia, octubre de 2011] estima en 42.000 millones de años luz. Al parecer, la teoría de Alan Guth y Andrei Linde sobre el universo inflacionario explica que el espacio se expande más rápido que la materia y la energía, pero me gustaría saber cómo se calcula dicha expansión y en que se basa la estimación propuesta del radio observable.

Javier Navarro
Pregunta formulada en el artículo «La revolución supracopernicana», del blog Cosmología de precisión, *de Juan García-Bellido*
www.investigacionyciencia.es/blogs

Responde García-Bellido: *El cálculo del radio del universo observable es sencillo en orden de magnitud, aunque los detalles dependen de los valores de los parámetros cosmológicos. Dicha distancia se calcula como el espacio recorrido por la luz desde el origen del universo. Como el universo no es estático, la distancia recorrida resulta varias veces mayor que el radio de Minkowski ($R_M = c\cdot t_0$, donde c denota la velocidad de la luz y t_0, la edad del universo): en concreto, unas 3,4 veces mayor. Aunque en un universo dominado por la materia ese factor sería 3, al añadir la contribución de la constante cosmológica (o energía oscura, que comenzó a afectar de manera apreciable a la expansión del universo hace unos 5000 millones de años) la cifra se eleva a 3,4. Por último, si tomamos t_0 = 13.700 millones de años, obtenemos como resultado unos 46.000 millones de años luz. El artículo de George Ellis apunta un valor de 42.000 millones de años luz. La diferencia obedece a la elección de los parámetros cosmológicos, dentro del error observacional.*

Con respecto a la expansión inflacionaria, la materia y la energía se expanden con el espaciotiempo (es la razón por la que la luz sufre un desplazamiento al rojo). El valor exacto de esa expansión depende de la escala de energías a la que se produzca el proceso inflacionario. Si, por ejemplo, nuestro universo comenzó en la escala de Planck como una fluctuación cuántica y terminó en la escala electrodébil, el factor de expansión asciende a 10^{33}. Esa cifra se aproxima a la expansión que tuvo lugar durante todo el período posterior a la inflación: desde 1 centímetro hasta los 10^{29} centímetros del universo actual (46.000 millones de años luz equivalen a unos $5\cdot10^{28}$ centímetros).

Juan García-Bellido
Instituto de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid/CSIC



Octubre 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

INGENIERÍA

Reconocimientos médicos instantáneos para edificios y puentes

En todos los terremotos, inundaciones y tornados que hemos visto a lo largo de 2011, ha sido necesario evacuar innumerables edificios para comprobar su estabilidad. Ello ha vuelto a poner de manifiesto que, en la mayoría de los casos, las estructuras siguen inspeccionándose mediante un procedimiento bastante rudimentario: a ojo. Para acelerar el proceso y conseguir una precisión mayor, se están estudiando recubrimientos electrónicos, algoritmos evolutivos y otros sistemas con el objetivo de determinar en tiempo real la integridad de las edificaciones.



Con el propósito de detectar la localización exacta de pequeños agrietamientos, Simon Laflamme, ingeniero de caminos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores están diseñando una «piel sensible», compuesta por un conjunto de parches flexibles adheridos a las zonas proclives a sufrir grietas. Al formarse, estas desplazarían ligeramente el cemento, lo que provocaría un cambio en la carga eléctrica del recubrimiento, fabricado con un plástico extensible mezclado con óxido de titanio. Cada día, un ordenador conectado a un conjunto de parches enviaría una corriente para medir la carga de cada uno. Laflamme y sus colaboradores han publicado los detalles de sistema en el *Journal of Materials Chemistry*.

Raimondo Betti, de la Universidad de Columbia, y sus colaboradores se encuentran investigando una técnica similar para puentes. A fin de evaluar el deterioro de los cables de los puentes colgantes, están probando cuarenta sensores en los cables del puente Manhattan, en Nueva York, los cuales controlan la temperatura, la humedad y la tasa de corrosión.

Aunque esos dispositivos detectan los daños producidos después de su instalación, ¿qué sucede con los desperfectos anteriores? Hod Lipson, experto en robótica de la Universidad de Cornell, y sus colaboradores han desarrollado un modelo informático que simula una estructura intacta y utiliza algoritmos que la hacen evolucionar hasta que se ajusta a los datos proporcionados por los sensores. La técnica permite obtener un balance más amplio de los daños.

No todos están convencidos del beneficio de esos proyectos. «Hasta ahora, no existen datos que, desde un punto de vista económico, avalen un mantenimiento continuo», afirma Laflamme. Otra dificultad podría residir en el rendimiento a largo plazo de estos sistemas, sobre todo en entornos violentos. Este aspecto deberá también someterse a investigaciones futuras.

—Charles Q. Choi

¿QUÉ ES ESTO?

Muchos animales cambian de color para confundirse con su entorno o imitar a otras especies, con lo que consiguen engañar a sus depredadores. Dos equipos han identificado hace poco los genes que controlan este proceso en *Heliconius*, un amplio género de mariposas tropicales. A lo largo de la evolución, varias especies de *Heliconius* han desarrollado un patrón de dibujos similares a pesar de sus situaciones geográficas diversas. Un estudio ha revelado que dieciocho genes regulan siete patrones de dibujos en las alas, los cuales advierten a las aves de la toxicidad de las mariposas. Otro estudio ha descrito el control por un único gen de los dibujos rojos en numerosas especies (incluida *H. erato*, en la fotografía, ampliada 15 veces). Arnaud Martin, doctorando de la Universidad de California en Irvine que participó en esta investigación, señaló que su trabajo ayuda a entender el modo en que los cambios en el ADN generan nuevos rasgos, como un cerebro mayor, un pulgar oponible o una colorida mariposa. *—Ann Chin*

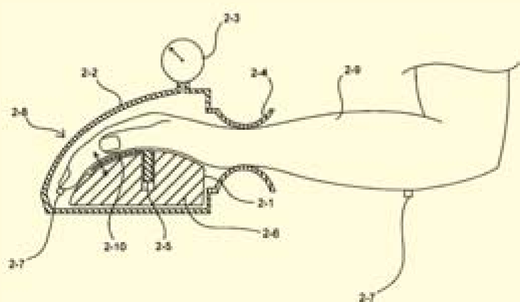


YADID LEVY, *REDUX PICTURES* (*puente*); CORTESÍA DE ARNAUD MARTIN, *UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, IRVINE* (*mariposa*)

PATENTES

Control de la temperatura en el cuerpo de los mamíferos: en la década de los noventa, Dennis Grahn y H. Craig Heller, biólogos de la Universidad Stanford, descubrieron una nueva forma de tratar una dolencia, la hipotermia postanestésica. Debido a esta enfermedad, los pacientes que se recuperan de los efectos de la anestesia sufren tanto frío que pueden pasar hasta una hora tiritando. Ello ocurre, en parte, porque la anestesia reduce la capacidad del cuerpo para controlar la temperatura. Aplicar calor al enfermo no siempre ayuda, por lo que Grahn y Heller decidieron aumentar el volumen de sangre que fluía hacia las manos de los pacientes y, después, suministrar calor a esa misma zona. «Las personas se recobraban al cabo de diez minutos», afirma Grahn. ¿A qué se debía? Los investigadores acababan de toparse con una característica de la biología de los mamíferos que podría aprovecharse en numerosas situaciones, incluidas aquellas en las que lo que se precisa es enfriar el cuerpo. Por ejemplo, para aumentar la resistencia atlética, ya que el sobrecalentamiento constituye uno de los principales factores que limitan el rendimiento físico.

Para regular la temperatura, una estrategia que adopta nuestro cuerpo consiste en controlar el flujo sanguíneo que llega a zonas epidérmicas especializadas y sin vello, como las palmas de las manos, las mejillas, la nariz y las plantas de los pies. Debajo de la piel de esas áreas se encuentran estructuras vasculares únicas, diseñadas para hacer llegar grandes volúmenes de sangre a la superficie. Cuando el cuerpo necesita liberar calor, expande los vasos sanguíneos y aumenta la cantidad de sangre que llega a dichas regiones, con lo que expulsa calor a través de la piel. Si lo que se necesita es conservar la temperatura, se restringe el flujo sanguíneo hacia esas zonas.



La patente con número 7.947.068 de la oficina estadounidense ofrece diversas formas para controlar tales procesos. Una de ellas ya está siendo utilizada por el equipo de fútbol americano de los Cuarenta y Nueve de San Francisco: los jugadores introducen sus manos en un dispositivo, del tamaño de una tetera, que crea un cierre hermético en torno a la muñeca; después, el «guante» hace que fluya sangre hacia la palma de la mano y la enfría, lo que conlleva una reducción general de la temperatura del cuerpo. El artilugio puede utilizarse en cualquier momento de un partido y solo necesita unos minutos para funcionar. Los ensayos, según Grahn, han mostrado que estos dispositivos pueden triplicar el rendimiento atlético.

—Adam Piore

FISIOLOGÍA

El problema de las armaduras

El 13 de agosto de 1415, el rey inglés Enrique V, con solo veintiocho años de edad, se dirigió a Francia al mando de su ejército. Al cabo de dos meses, la disentería había acabado con una cuarta parte de las tropas, mientras que un ejército francés cuatro veces mayor bloqueaba la ruta de escape hacia Calais y el Canal de la Mancha. El invierno se acercaba y los alimentos escaseaban. Sin embargo, en uno de los reveses más llamativos de la Historia militar, menos de siete mil soldados ingleses, la mayoría de ellos arqueros, rechazaron el ataque de entre veinte mil y treinta mil caballeros franceses vestidos con poderosas armaduras, cerca de la población francesa de Agincourt, y mataron a miles de ellos. La obra de Shakespeare, Enrique V, atribuyó la victoria a las inspiradas arengas del rey Enrique; el conocido historiador militar John Keegan opina que se debió más bien a la multitudinaria carga francesa, que resultó contraproducente. Pero un estudio reciente realizado por fisiólogos del ejercicio físico apunta a una nueva razón de la masacre: las armaduras no debieron resultar muy adecuadas para la lucha.

Un grupo de investigadores de la Universidad de Leeds colocó a una serie de voluntarios vestidos con armadura sobre una cinta rodante y midió su consumo de oxígeno. La armadura que se solía utilizar en el siglo xv pesaba entre treinta y cincuenta kilos, repartidos por todo el cuerpo, desde la cabeza hasta los pies. Debido a esa distribución del peso, los voluntarios tenían que hacer enormes esfuerzos para mover sus piernas recubiertas por planchas de acero y andar. Además, las corazas les obligaban a realizar inspiraciones rápidas y poco profundas. Los investigadores descubrieron que las armaduras hacían doblar las necesidades metabólicas de los voluntarios, aumento que representaba solo un setenta por ciento cuando el mismo peso se transportaba en una mochila.

Por supuesto, las batallas medievales no tenían lugar en cintas rodantes. El campo de Agincourt estaba cubierto de barro, ya que había sido arado poco antes para ser plantado con el trigo de invierno y se había empapado con las fuertes lluvias de octubre. Los franceses cargaron a través de casi trescientos metros de ese terreno enfangado, mientras recibían las flechas de los arqueros ingleses. Si combinamos el esfuerzo necesario para correr con una armadura puesta y el requerido para avanzar sobre el fango, afirma Graham Askew, uno de los directores del estudio, obtenemos un gasto energético al menos cuatro veces mayor; el suficiente, parece ser, para cambiar la Historia.

—Michael Moyer



CORTESÍA DE LA OFICINA DE PATENTES Y REGISTROS DE EE.UU. *(guante térmico)*; GETTY IMAGES *(armadura)*

MEDICINA

Nuevos dispositivos para diabéticos

Para millones de pacientes, la vida supone una batalla constante para mantener el equilibrio del nivel de azúcar en sangre. Ello les obliga a medir su concentración de glucosa y tomar insulina a lo largo del día. Una nueva generación de dispositivos conocidos como «páncreas artificiales» podría convertir en obsoleto el tedioso tratamiento actual de la diabetes. En las personas sanas, el páncreas produce de forma natural insulina, la cual convierte en energía el azúcar y el almidón. Sin embargo, las personas con diabetes de tipo 1 no producen insulina por sí solas, y los que sufren diabetes de tipo 2 la producen en cantidades insuficientes. Todos los pacientes con diabetes de tipo 1 y muchos con la de tipo 2 deben inyectarse insulina para que su cuerpo disponga de la energía que necesitan. Hacerlo de modo adecuado exige una monitorización constante de los niveles sanguíneos de azúcar, porque las dosis apropiadas dependen de factores como la cantidad de alimentos ingeridos o el ejercicio físico realizado.

Stuart Weinzimer, endocrinólogo de la Universidad de Yale, ha ideado un páncreas artificial que combina dos técnicas ya existentes: un controlador continuo de la glucosa, que utiliza un sensor colocado bajo la piel para medir los niveles sanguíneos de glucosa cada pocos minutos, y una bomba de insulina, que dispensa insulina a través de un tubo que también está implantado bajo la piel. El sensor de glucosa envía sus datos por vía inalámbrica a un ordenador de bolsillo. Este ordenador es poco mayor que un iPhone y utiliza *software* desarrollado por Medtronic, una empresa con base en Minneapolis. El programa evalúa los datos del sensor de glucosa y ordena a la bomba que dispense la cantidad correcta de insulina. En un congreso de la Asociación Estadounidense de Diabetes celebrado en junio, el equipo de Weinzimer reveló que el 86 por ciento de los enfermos con diabetes de tipo 1 que participaron en su estudio y utilizaron el páncreas artificial alcanzaron el nivel deseado de glucosa durante la noche; en cambio, solo el 54 por ciento de los pacientes que tenían que despertarse para activar una bomba de insulina lograron ese nivel. En las universidades de Boston, Cambridge y Stanford se están desarrollando otros sistemas similares.

Todavía quedan por solucionar varios problemas técnicos. En ocasiones el dispositivo se adapta con dificultad a los cambios drásticos del nivel de glucosa, como los que se producen después de hacer ejercicio. Deberá someterse por tanto a nuevos estudios que podrían prolongarse años. El proceso incluirá ensayos a gran escala con pacientes, condición necesaria para que la Administración de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos apruebe el dispositivo. Sin embargo, Weinzimer afirma que la opinión entusiasta de los participantes de su estudio le infunde ánimos en el largo camino hacia la comercialización.

—Elizabeth Svoboda



HISTORIA DE LOS ALIMENTOS

La popularización y las virtudes del chocolate

El chocolate era la bebida favorita de los mayas, los aztecas y otras poblaciones mesoamericanas mucho antes de que los españoles lo trajesen a Europa. Las pruebas arqueológicas indican que el chocolate se ha venido consumiendo desde hace al menos 3100 años, y no solo como alimento: los mayas y otras culturas precolombinas ofrecían vainas de cacao a los dioses en diversos rituales, incluidos los sacrificios humanos.

Sin embargo, fue un protestante irlandés quien alumbró la que probablemente se convertiría en la idea de mayor trascendencia en toda la historia del chocolate. Hacia 1860, Hans Sloane, médico y naturalista cuya colección de libros y muestras naturales supuso el nacimiento del Museo Británico, se encontraba al servicio del gobernador de Jamaica documentando plantas y animales locales. Sloane descubrió que la bebida amarga del chocolate de la isla le resultaba mucho más sabrosa si la mezclaba con leche. Poco después patentó su invención. Aunque a muchos les gustara el chocolate preparado con agua caliente, la versión de Sloane se popularizó con rapidez en Inglaterra y otras partes de Europa. Con el tiempo, la leche se convertiría también en un complemento predilecto para el chocolate sólido.

Hoy, los efectos beneficiosos del chocolate para la salud se encuentran bien documentados. Según explica Joe Vinson, químico de la Universidad de Scranton, algunos antioxidantes, como polifenoles y flavonoides, representan hasta un ocho por ciento del peso seco de la semilla de cacao. Los antioxidantes neutralizan los radicales libres, moléculas muy reactivas que, de otro modo, dañarían las células. No se debe a una coincidencia que el árbol del cacao (y otras plantas ricas en antioxidantes, como el café o el té) proceda de latitudes bajas. «Las plantas con un elevado contenido en antioxidantes crecen en lugares cercanos al ecuador, con mucha insolación», apunta Vinson. Los rayos ultravioleta descomponen las moléculas orgánicas en radicales libres, por lo que numerosas plantas tropicales producen antioxidantes para neutralizar ese exceso de radicales.

Aunque una ingesta excesiva aporte demasiadas calorías, los estudios con seres humanos y animales han puesto de manifiesto que un consumo moderado de chocolate ejerce efectos positivos sobre la presión arterial, retarda la aparición de la ateroesclerosis y disminuye los índices de colesterol «malo». El chocolate también puede mejorar las facultades mentales: un estudio noruego reveló que los ancianos que consumían chocolate, vino o té (todos ellos alimentos ricos en flavonoides) obtenían mejores resultados en las pruebas cognitivas.

—Davide Castelvecchi

GETTY IMAGES (*chocolate*); NASA/JPL-CALTECH (*Vesta*)

AGENDA

CONFERENCIAS

14 de diciembre
Lentes gravitatorias: la observación de la materia oscura con rayos luminosos
Konrad Kuijken, Universidad de Leiden
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

20 de diciembre
Lo que Darwin no pudo ver
Carles Pedrós Alió, Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (CSIC)
Biblioteca Sagrada Familia
Barcelona
www.icm.csic.es/icmdivulga

EXPOSICIONES

Hasta el 26 de febrero
Artifex. Ingeniería romana en España
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logro-o.org/casadelasciencias

Abracadabra. Ilusionismo y ciencia
Cosmocaixa
Madrid
www.obrasocial.lacaixa.es

Neandertales, desde Iberia hasta Siberia
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Hasta el 22 de enero de 2012
Vesta y Ceres. Los orígenes del sistema solar
La Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es



OTROS

1 de diciembre – Conferencia espectáculo
Química de la luz
Marta Segura y Josep M. Valls
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

1 y 2 de diciembre – Simposio
Historia de la física en España en el siglo xx: balance y perspectivas
Centro de Historia de la Ciencia
Universidad Autónoma de Barcelona
www.cehic.es

GEOFÍSICA

Una década de investigación sobre el geopotencial

El aluvión de datos cosechados durante el último decenio por una constelación de satélites artificiales está arrojando luz sobre numerosos campos de investigación

El 23 de febrero de 1999, con el lanzamiento del satélite danés Oersted se inició una nueva era de oportunidades para la ciencia, dedicada a promover y coordinar la monitorización continua de los campos potenciales de nuestro planeta. A este período se le ha denominado «década de la investigación sobre el geopotencial». Desde ese momento, diversas misiones de satélites artificiales han visto combinados sus datos, lo que ha proporcionado una cantidad de información sin precedentes sobre los campos gravitatorio y magnético terrestres. Entre estos satélites destacan, además del Oersted, el CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), el GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), el SAC-C (Satélite de Aplicaciones Científicas) y, en fecha más reciente, el GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer).

Esos no son los primeros satélites con capacidad de medir ambos campos potenciales terrestres (magnético y gravimétrico). Sin embargo, nunca habían operado de forma simultánea dos técnicas de observación terrestre independientes durante un período tan prolongado. Todo ello ha tenido un gran impacto científico. El análisis de los datos cosechados, junto con la aplicación de determinadas técnicas matemáticas, ha proporcionado, entre otros resultados, un conocimiento de los fondos marinos impensable hace tan solo veinte años (se han detectado nuevas cadenas volcánicas y montañas submarinas). Presentamos a continuación algunos de los principales avances realizados merced a esa década de investigación sobre el geopotencial.

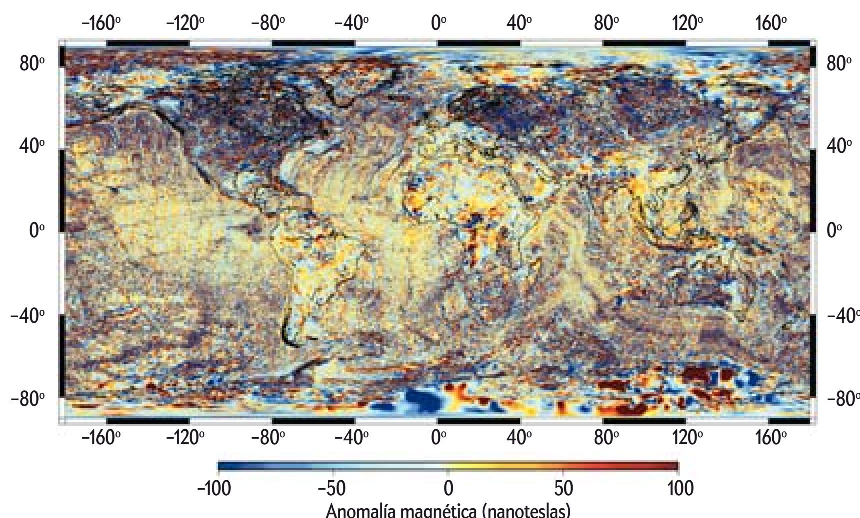
Campo magnético

Nuestro planeta dispone de un campo magnético que actúa a modo de escudo frente a las radiaciones cósmicas. Lo originan dos tipos de corrientes: las provocadas por materiales magnetizados y las generadas por corrientes eléctricas. Las primeras se hallan localizadas en la corteza terrestre. Las segundas presentan una distribución más compleja. La mayor aportación al campo magnético terrestre corresponde al campo interno; este viene del interior del planeta, en concreto, del núcleo externo. Contribuyen también otras corrientes, localizadas en la ionosfera, la magnetosfera y en los océanos, pero sus efectos son menores.

La posición de los polos magnéticos varía de forma continua. Presenta un claro desplazamiento hacia el noroeste, a una velocidad promedio de unos 10 kilómetros anuales (km/año). Observaciones recientes indican que dicho desplazamiento se ha acelerado hasta unos 40 km/año. Otros estudios muestran que la intensidad de nuestro campo magnético se está debilitando a un ritmo de un 5 por ciento por siglo. Medidas realizadas mediante el satélite CHAMP lo han confirmado; asimismo, sugieren un debilitamiento aún superior en ciertas zonas del Atlántico Sur, donde ha llegado a disminuir casi un 12 por ciento en los últimos 30 años. Dicha zona coincide con la de mayor debilidad de nuestro campo magnético. La constelación de satélites magnéticos antes mencionada permite observar estas alteraciones del campo interno con una precisión (espacial y temporal) sin precedentes. Si bien estos procesos de origen profundo pudieran parecernos ajenos a nuestro devenir diario, son capaces de alterar aspectos cotidianos como la duración del día o de afectar a la operatividad de satélites y vehículos espaciales.

Otro de los proyectos que se han beneficiado del aluvión de nuevos datos ha sido el del Mapa mundial de anomalías magnéticas (WDMAM, por sus siglas en inglés). Los datos procedentes de los satélites artificiales, principalmente del CHAMP, han proporcionado la información básica para elaborar un mapa de anomalías global, sobre el cual se han superpuesto luego los detalles obtenidos a partir de estudios más locales. Todo ello ha permitido obtener datos de lugares de

SATÉLITE	ORGANIZACIÓN Y PÁGINA WEB DEL PROYECTO	OBSERVACIONES	LANZAMIENTO	ESTADO ACTUAL
Oersted	Instituto Meteorológico Danés web.dmi.dk/fsweb/projects/oersted	Magnéticas	Febrero de 1999	Operativo con limitaciones
CHAMP	Centro Alemán de Investigación en Geociencias www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ	Gravimétricas y magnéticas	Julio de 2000	Misión finalizada en septiembre de 2010
SAC-C	Comisión Nacional de Actividades Espaciales www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html	Magnéticas	Noviembre de 2000	Operativo
GRACE	NASA, Universidad de Texas y Centros Alemanes de Investigación Aeroespacial y en Geociencias www.csr.utexas.edu/grace	Gravimétricas	Marzo de 2002	Operativo
GOCE	Agencia Espacial Europea www.esa.int/SPECIALS/GOCE	Gravimétricas	Marzo de 2009	Operativo
Swarm	Agencia Espacial Europea www.esa.int/esaLP/LPswarm.html	Magnéticas	Previsto para julio de 2012	En desarrollo



Mapa mundial de anomalías magnéticas referido a una altitud de 5 kilómetros sobre el nivel del mar. Se ha obtenido tras combinar información procedente de estudios marinos, terrestres, aéreos y satélites artificiales (principalmente del CHAMP).

los que se disponía de una información muy limitada o nula, como el centro del continente africano, Sudamérica o los océanos.

Otros aspectos novedosos han sido la obtención de mapas de conductividad del interior de la Tierra y la identificación de una de las componentes de la marea oceánica a partir de datos magnéticos marinos.

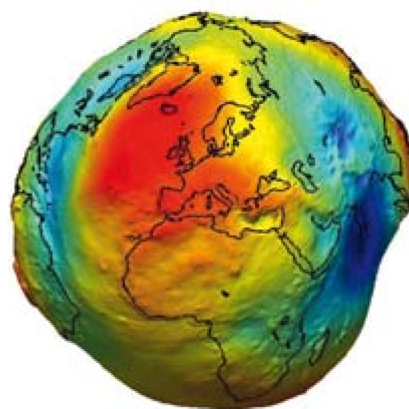
Campo gravitatorio

La fuerza de la gravedad controla procesos en el interior y el exterior de nuestro planeta. Desde que Newton explicara hace más de 300 años los principios básicos de la gravitación, hemos aprendido que el valor de *g* es igual a 9,8 metros por segundo cuadrado (m/s^2). Sin embargo, el desarrollo de herramientas de medida cada vez más precisas ha demostrado que *g* varía a lo largo de la superficie terrestre: en el ecuador vale 9,78 m/s^2; en los polos, 9,83 m/s^2. Estas variaciones se producen principalmente por tres factores.

El primero se debe a que la Tierra no es esférica. Presenta una forma achatada, por lo que la distancia entre el centro del planeta y la superficie es mayor en el ecuador que en los polos. El segundo factor corresponde a la irregularidad de la superficie terrestre. Y el tercero, a la heterogeneidad de los materiales que la componen (los depósitos minerales, de petróleo y las reservas de aguas subterránea afectan al campo gravimétrico terrestre).

Otros parámetros que pueden hacer variar *g* son las alteraciones del nivel del mar, movimientos de hielo, terremotos o erupciones volcánicas. Los efectos gravitatorios de estos fenómenos varían con el tiempo y pueden superponerse entre sí. Para ahondar en la comprensión de estos procesos, resulta necesario, por tanto, conocer con gran precisión el campo gravitatorio.

Ese campo gravitatorio irregular se representa mediante una superficie de igual potencial gravitacional, que se correspondería con la superficie de un océano en ausencia de mareas y corrientes. Determinar dicha superficie, denominada «geoide», constituye el objetivo fundamental de las misiones satelitales. Resulta clave para medir la circulación oceánica, el nivel medio del mar y la dinámica del hielo (aspectos que guardan una estrecha relación con el cambio climático); asimismo, proporciona un marco de referencia común para los mapas a nivel mundial.



Superficie del geoide obtenido a partir de los datos del satélite GOCE. Ilustra las irregularidades del campo gravitatorio. En las zonas rojas el geoide se eleva; en las azules, se deprime.

Las misiones CHAMP y GRACE han detectado en una señal derivada de la gravedad una variabilidad anual atribuible a alteraciones en las reservas de agua superficial y subterránea; ello permite realizar estudios hidrológicos mediante la combinación de procesos a escalas regionales y globales. En fecha reciente, algunos de estos estudios han detectado variaciones en el campo de la gravedad en lugares como la India o California, donde el ser humano está haciendo un uso no sostenible de las reservas de agua subterránea.

Demuestra la sensibilidad de esos satélites el hecho de que han sido capaces de detectar la dilatación que sufrió la corteza terrestre tras el terremoto de Sumatra (diciembre de 2006), el de Chile (febrero de 2010) o el de Japón (marzo de 2011). Se plantean, pues, nuevas aplicaciones de esta técnica, como la detección de deformaciones previas a los terremotos. En el mismo sentido se han detectado variaciones en el valor de la gravedad atribuibles a la redistribución de la masa de agua entre la atmósfera, el océano y los continentes (alteraciones debidas a fenómenos como El Niño).

Perspectivas de futuro

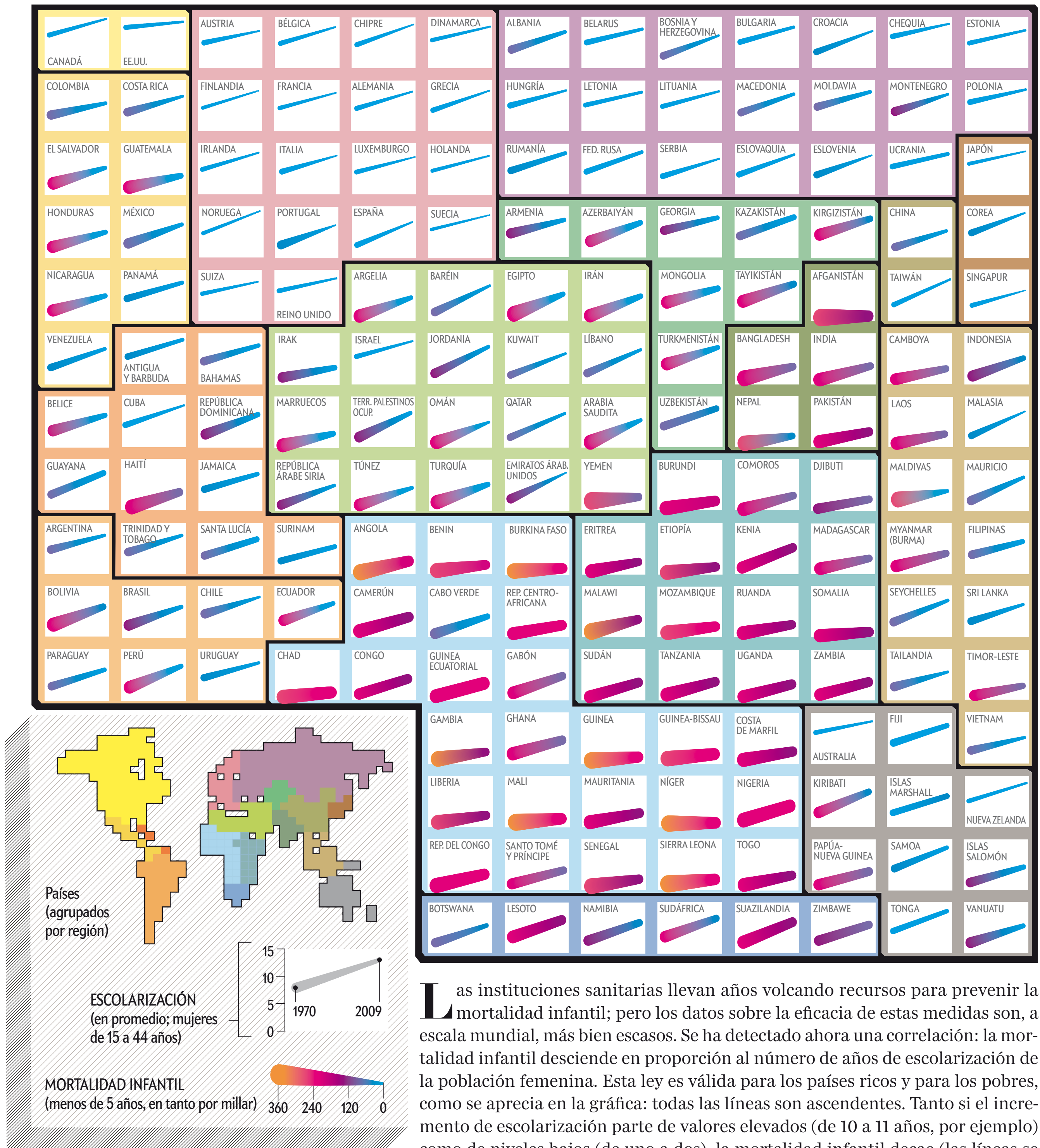
Se espera que los datos de todas esas misiones nos permitan descubrir nuevos procesos geofísicos o ahondar en los ya conocidos. Hay puestas grandes expectativas en las misiones de la ESA Swarm («enjambre») y GOCE. La primera está previsto lanzarla en julio de 2012; permitirá prolongar los estudios de nuestro campo magnético, posibilitando la aplicación de modelos predictivos. Por fin, la misión GOCE, más precisa y con una resolución espacial mucho mejor que las anteriores, será con toda seguridad una fuente de información durante años.

—Manuel Catalán
Sección de geofísica
Real Observatorio de la Armada
Alfonso Muñoz Martín
Facultad de ciencias geológicas
Universidad Complutense de Madrid

SALUD

Madre con escuela, bebé con vida

La mortalidad infantil disminuye a la par que aumenta la escolarización de la mujer



Las instituciones sanitarias llevan años volcando recursos para prevenir la mortalidad infantil; pero los datos sobre la eficacia de estas medidas son, a escala mundial, más bien escasos. Se ha detectado ahora una correlación: la mortalidad infantil desciende en proporción al número de años de escolarización de la población femenina. Esta ley es válida para los países ricos y para los pobres, como se aprecia en la gráfica: todas las líneas son ascendentes. Tanto si el incremento de escolarización parte de valores elevados (de 10 a 11 años, por ejemplo) como de niveles bajos (de uno a dos), la mortalidad infantil decae (las líneas se hacen más delgadas). En promedio mundial, la educación explica un 51 por ciento de tal declive —es, con mucho, el parámetro de mayor peso— según un estudio realizado por el estadounidense Instituto de Metrología y Valoración de la Salud. Parece que las mujeres con una educación más completa exhiben mayor acierto en las decisiones relativas a la salud, la nutrición, la inmunización y los métodos anticonceptivos.

—Mark Fischetti

FUENTE: INSTITUTO DE METROLOGÍA Y VALORACIÓN DE LA SALUD, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON

INGENIERÍA AEROESPACIAL

Otros desafíos en los viajes tripulados a Marte

La entrada en la órbita y atmósfera marcianas, y el aterrizaje en el planeta rojo entrañan notables dificultades técnicas

Cuando se habla sobre las dificultades que entrañarán los futuros viajes tripulados a Marte, suelen tratarse únicamente los aspectos relacionados con su larga duración y con la exposición a la radiación durante la travesía. Menos conocidos son los desafíos asociados a las fases de entrada en la órbita marciana (captura orbital), entrada en la atmósfera marciana y aterrizaje.

Los planes actuales para la exploración humana de Marte contemplan el aterrizaje de una nave de entre 40 y 80 toneladas de peso en las proximidades de una instalación enviada con anterioridad, con una precisión del orden de decenas de metros. Ello supone, de forma simultánea, un incremento de dos órdenes de magnitud en la cantidad de masa aterrizada y un incremento de cuatro órdenes de magnitud en la precisión en el aterrizaje con respecto a las misiones robóticas que se han volado hasta la fecha. Los desafíos técnicos impuestos por estos objetivos para las fases de captura orbital, entrada y aterrizaje en Marte son de enorme calibre, pues implican la ejecución de nuevas maniobras y el desarrollo de nuevas técnicas.

Con el objeto de satisfacer los requisitos relativos al peso de la nave o, en todo caso, para reducir su peso, todo apunta a que se requerirá que la entrada en la órbita marciana no se realice mediante motores cohete, lo cual exigiría el transporte de grandes cantidades de combustible, sino mediante el frenado que proporcionaría la atmósfera marciana. Esta maniobra aeroasistida se denomina aerocaptura. Aunque conocida a nivel teórico, supone en sí misma un gran reto, pues nunca se ha puesto en práctica.

Tras la aerocaptura, la nave entraría en órbita marciana para, más tarde, afrontar la entrada atmosférica y acometer el descenso a la superficie. Tanto la aerocaptura como la entrada presentan dificultades técnicas que derivan, sobre todo, de la atmósfera de Marte, que es unas cien veces menos densa que la terrestre. La atmósfera marciana es demasiado ligera para provocar un gran frenado, pero lo bastante densa para producir un efecto térmico significativo. Por esta razón, la nave deberá poseer un escudo térmico —o dos, uno para la aerocaptura y otro para la entrada— de grandes dimensiones con el objeto de presentar al flujo aerodinámico una gran área de frenado.

Sin embargo, las dimensiones requeridas para esos escudos térmicos exceden con creces lo que cualquier cohete podría albergar y lanzar al espacio desde la Tierra. Es por esta razón por la que en la actualidad se están desarrollando desaceleradores aerodinámicos hinchables provistos de protección térmica. Estos escudos térmicos hinchables estarían plegados durante el lanzamiento y serían desplegados para su uso en la aerocaptura y la entrada. Dado que los efectos térmicos producidos durante la aerocaptura son de mayor intensidad que los experimentados durante la entrada, se debate ahora si la arquitectura de las misiones a Marte debería contar con un solo escudo térmico que fuera usado en ambas fases o si, por el contrario, cada fase debería contar con su propio escudo térmico especializado.

Al final de la entrada atmosférica, la nave llega a una velocidad más allá de la cual prácticamente no puede ser frenada. Debido a las características de la nave y a la poca densidad atmosférica, esta velocidad «terminal» es aún supersónica. Si bien la última fase de descenso debe ser propulsada para lograr un aterrizaje suave y próximo al objetivo, se desea que el inicio de la misma se produzca a velocidades subsónicas, pues la experiencia en el encendido de grandes motores cohete contra un flujo atmosférico supersónico de gran presión dinámica es escasa. Sin embargo, la opción de contar con una fase intermedia que usara paracaídas u otros mecanismos de desaceleración que redujeran la velocidad a niveles subsónicos sería impracticable dado el peso de la nave y por cuestiones operativas.

De ahí que la opción más razonable que se baraja en la actualidad es, ante la falta de alternativa y a pesar de los inconvenientes, la del inicio de la última fase de propulsión a velocidades supersónicas. Esta opción, como se ha explicado, no está exenta de desafíos técnicos: la inte-



Ingenieros de la NASA inspeccionan en el laboratorio el vehículo hinchable experimental de reentrada.

racción del flujo emitido por los retrocohetes y el flujo atmosférico supersónico presentan problemas de estabilidad y de control que deben comprenderse antes de que la retropropulsión supersónica pueda utilizarse en Marte.

Así pues, para que puedan realizarse con éxito las fases de captura orbital, entrada y aterrizaje en Marte en futuras misiones tripuladas, todo apunta a que será necesario invertir en la demostración de nuevas maniobras como la de aerocaptura. Asimismo, deberá avanzarse en el desarrollo de nuevas técnicas como los escudos térmicos hinchables y en el estudio y caracterización de la retropropulsión supersónica.

—Eduardo García Llama
Sección de mecánica de vuelo
Centro Espacial Johnson, NASA

BIOQUÍMICA

Dulces misterios de la naturaleza

La química computacional arroja luz sobre la formación de los azúcares

El cincuenta por ciento de las calorías que ingerimos diariamente proviene de los carbohidratos, nuestro «combustible biológico» y la forma primaria de almacenamiento y consumo de energía en los organismos. Asimismo, los azúcares desempeñan funciones clave en procesos de reconocimiento y señalización celular (algunos carbohidratos unidos a virus consiguen despistar el sistema inmunitario). Conocer la química de estas biomoléculas fundamentales constituye, pues, un reto de gran interés.

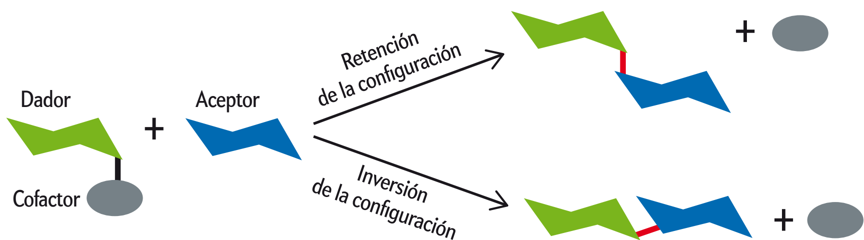
En fecha reciente hemos ahondado en la comprensión de una de las reacciones más importantes para el metabolismo de los carbohidratos. Nos referimos a la formación del enlace glicosídico, el enlace covalente entre monosacáridos o azúcares simples (monómeros) mediante el cual se construyen polisacáridos como el almidón, el glucógeno o la celulosa (polímeros).

Mecanismos de síntesis

La mayoría de los enlaces glicosídicos se sintetizan en la naturaleza a partir de monosacáridos activados con un cofactor que luego se desprende. En concreto, se forman mediante la transferencia de un monosacárido: de la molécula dadora (un azúcar unido a un cofactor) a la aceptora (normalmente otro azúcar, aunque también puede ser un lípido).

La formación del enlace de marras viene catalizada por las glicosiltransferasas. Estas enzimas pueden actuar de varios modos, según retengan o inviertan la configuración del carbono que forma el enlace glicosídico. Cuando la mantienen, el aceptor se sitúa en la misma cara que ocupaba el cofactor (retención de la configuración). Cuando la invierten, se sitúa en la cara opuesta (inversión de la configuración). El mecanismo de las glicosiltransferasas que producen inversión de la configuración es bien conocido. El de las que producen retención, en cambio, constituye uno de los misterios de la glicobiología. Ello se debe a que la presencia del cofactor, que suele ser una molécula voluminosa (como el nucleótido uridina difosfato, UDP), dificulta el acceso del aceptor (que se aproxima por la misma cara).

Algunos autores propusieron que, además de las dos moléculas de azúcar (dador y aceptor), también la enzima participaba en la reacción. En concreto, mediante la formación de un enlace covalente entre el dador y un aminoácido de la

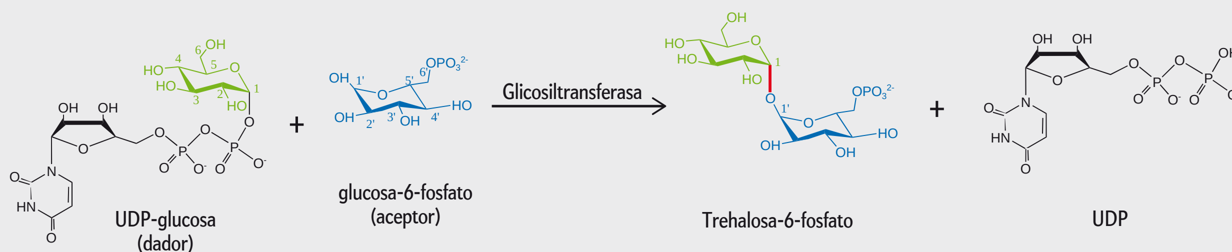


El enlace glicosídico (*rojo*) **se forma mediante la transferencia de un monosacárido** (*verde*) **de la molécula dadora (monosacárido activado por un cofactor,** *gris*) **a la aceptora** (*azul*)**. El aceptor puede quedar en la misma cara que ocupaba el cofactor (retención de la configuración) o en la cara opuesta (inversión de la configuración).**

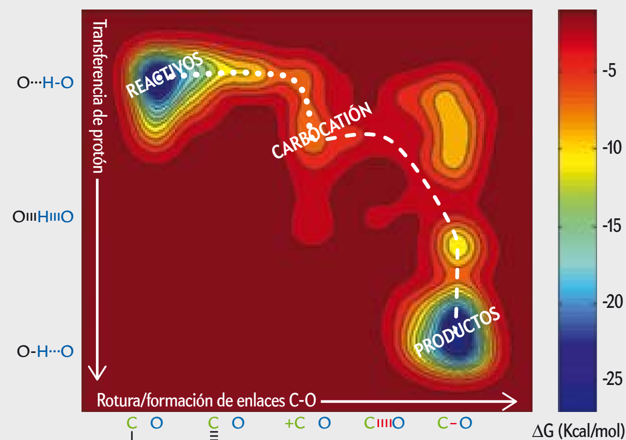
NASA/SEAN SMITH (*vehículo hinchable*)

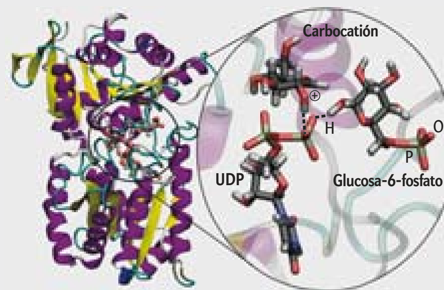
MECANISMO EN DOS ETAPAS

La síntesis de la trehalosa, un disacárido de gran interés biológico, empieza mediante la formación de un enlace glicosídico (*rojo*) catalizada por la enzima trehalosa-6-fosfato sintasa. En esta reacción, se transfiere un monosacárido de un dador a un aceptor. La molécula dadora corresponde a una glucosa (*verde*) activada por el nucleótido uridina difosfato (UDP). La aceptora es la glucosa-6-fosfato (*azul*), una molécula producida por la fosforilacion de la glucosa en su carbono 6.



Mediante cálculos teóricos se ha obtenido la variación energética que se produce durante esta reacción enzimática. Se representa aquí en función de las dos coordenadas principales del mecanismo: la transferencia del protón del aceptor al grupo fosfato del UDP (ordenadas) y la rotura/formación de enlaces C-O (abscisas). Cada línea de contorno corresponde a una variación energética (ΔG) de 2 kilocalorías por mol (kcal/mol). Hipótesis anteriores señalaban que este proceso implicaba la formación de un estado de transición muy energético e inestable. Sin embargo, el estudio teórico sugiere que ello no es así. La reacción pasaría por la formación de un intermedio carbocatión y tendría lugar en dos etapas: en la primera (*línea de puntos*) se rompe el enlace covalente entre el azúcar dador y el nucleótido, formándose el carbocatión (*estructura molecular*); en la segunda (*rayas*), el carbocatión reacciona con el azúcar aceptor, formándose el enlace glicosídico.





enzima próximo a este, con la consiguiente formación de un intermedio glicosil-enzima. Pero la ausencia de pruebas experimentales llevó a pensar en otro tipo de mecanismo —extremadamente inusual aunque con precedentes—, donde la reacción tenía lugar por una única cara del monosacárido del dador: el mecanismo «a una cara» (*front face*). Esta hipótesis ha estado rodeada de una intensa controversia, puesto que implica la formación y rotura simultánea de dos enlaces covalentes en una misma región del espacio, un proceso muy costoso energéticamente y, por tanto, poco probable.

Química teórica

Para desvelar el misterio de la transferencia de azúcares hemos recurrido a la química teórica. En concreto, a las técnicas de dinámica molecular cuántica o *ab initio* (AIMD, por sus siglas en inglés). Estas técnicas permiten simular la evolución de los átomos en el tiempo y, a su vez, de los electrones (se calcula la densidad electrónica conforme los átomos se mueven y reaccionan). Actualmente, gracias al perfeccionamiento de las mismas y al uso de superordenadores, se puede simular una reacción química en el interior de una enzima, obteniéndose una «visión microscópica» de la realidad.

En nuestro caso, viene a ser como si miráramos con un microscopio muy potente el centro activo de la enzima y viéramos cómo se acercan las dos moléculas de azúcar para formar un enlace glicosídico. Se obtienen, por tanto, detalles del mecanismo catalítico que no son accesibles mediante técnicas de laboratorio, como la estructura de estados de transición o intermedios de vida muy corta (metastables). Lo único que se necesita son las posiciones iniciales de los átomos de la enzima, información que nos proporciona la biología estructural.

Intermedio carbocatión

Mediante AIMD, hemos estudiado el mecanismo catalítico de la glicosiltransferasa trehalosa-6-fosfato sintasa. Esta enzima participa en la síntesis de la trehalosa, un disacárido natural de menor poder edulcorante que el azúcar común (sacarosa), pero más estable, usado sobre todo en tecnología de los alimentos por su poder conservante. Además, no se halla presente en mamíferos, lo que la convierte en una diana prometedora para el desarrollo de inhibidores bacterianos y fungicidas.

Los resultados de nuestra simulación concuerdan con la hipótesis del mecanismo «a una cara». Sin embargo, indican que la síntesis del enlace glicosídico no se produce de manera concertada (en una sola etapa), sino que tiene lugar a lo largo de varias etapas (dos como mínimo) separadas por barreras energéticas muy pequeñas. En primer lugar, se rompe el enlace covalente entre el azúcar dador

CORTESÍA DE LOS AUTORES

(glucosa) y el nucleótido, formándose un intermedio con carga positiva (carbocatión). El azúcar aceptor (glucosa-6-fosfato) interacciona con el dador para facilitar esta rotura. A continuación, el carbocatión reacciona rápidamente con el aceptor, formándose el enlace glicosídico. A su vez, se transfiere un protón del aceptor al grupo fosfato del UDP, que se libera.

El estudio, publicado en octubre de este año en *Angewandte Chemie*, demuestra que el mecanismo «a una cara» es viable. Tendría lugar mediante la formación de un carbocatión de vida media extremadamente corta —por tanto, muy difícil de detectar en un experimento de laboratorio— que se desplaza rápidamente del «dador» al «aceptor». Por tanto, contrariamente a lo que se pensaba, el mecanismo «a una cara» no implica la formación de un estado de transición de alta energía muy inestable.

En fecha reciente, Benjamin G. Davis, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores midieron los cambios de la velocidad de la reacción de la glicosiltransferasa trehalosa-6-fosfato sintasa en función de la masa de los átomos (efecto isotópico cinético). Los resultados de la investigación, publicados en agosto en *Nature Chemical Biology*, son también consistentes con el mecanismo «a una cara». Los datos experimentales confirman, pues, nuestra predicción teórica.

El conocimiento del mecanismo de acción de las glicosiltransferasas ayudará a modificar la funcionalidad de las mismas, incidiendo en la obtención más eficiente de carbohidratos ya conocidos y de nuevas estructuras. Asimismo, facilitará el diseño de inhibidores para glicosiltransferasas implicadas en enfermedades infecciosas.

—Carme Rovira Virgili
y Albert Ardèvol Grau
ICREA, Parque Científico de Barcelona e Instituto de Química Teórica y Computacional de la UB

PARTÍCULAS ELEMENTALES

En busca de la última transformación de los neutrinos

El experimento Double Chooz intenta medir un parámetro desconocido del modelo estándar

En 1930, Wolfgang Pauli postuló la existencia de una «partícula indetectable» para explicar la aparente no conservación de la energía en la desintegración beta. La hipotética partícula se caracterizaba por carecer de carga eléctrica y poseer una masa nula o muy pequeña, lo que condujo a Enrico Fermi a bautizarla con el nombre de *neutrino*, «neutrón diminuto». Veintiséis años después de la predicción de Pauli, se detectaban los primeros antineutrinos en las proximidades de un reactor nuclear.

Hoy en día sabemos que los neutrinos abundan en el universo. Sin embargo, apenas interaccionan con la materia, por lo que resultan muy difíciles de detectar: cada segundo, millones de neutrinos atraviesan la palma de su mano sin dejar rastro. También sabemos que existen tres tipos o familias: neutrinos electrónicos, muónicos y tauónicos. Hasta hace un decenio, el modelo estándar de las partículas elementales asignaba a los neutrinos una masa exactamente igual a cero. Al ser leptones sin carga y sin masa, solo experimentarían una de las cuatro fuerzas fundamentales: la interacción débil.

A finales del siglo xx, sin embargo, se observó un déficit con respecto a lo esperado en el flujo de neutrinos provenientes del Sol y en el de neutrinos atmosféricos (los que se crean en las capas altas de la atmósfera debido al bombardeo de los rayos cósmicos). Esa «desaparición» fue verificada más tarde al medir el flujo de neutrinos producidos en reactores nucleares y aceleradores de partículas. El resultado obedecía al fenómeno que hoy denominamos *oscilaciones*, la súbita metamorfosis de un tipo de neutrino en otro.

Esta capacidad de transmutación entre familias de neutrinos solo resulta posible si estos poseen masa. Esta puede ser ínfima, pero ha de ser distinta de cero. La masa de los neutrinos implica la existencia de una serie de procesos físicos que, a día de hoy, no comprendemos en detalle.



Fotomultiplicadores y vasijas de uno de los detectores del experimento Double Chooz, que pretende medir las oscilaciones de los neutrinos generados en la central nuclear de Chooz, en Francia.

DSM/IRFU/SPP

Las oscilaciones entre neutrinos de familias diferentes requirieron ampliar el modelo estándar mediante la introducción de tres parámetros llamados *ángulos de mezcla*. Dos de ellos, los que gobiernan las oscilaciones de los neutrinos solares y los atmosféricos, ya han sido medidos en diferentes experimentos. Del tercero, sin embargo, continuamos sin conocer su valor, si bien se sabe que es muy pequeño y podría ser incluso nulo.

Ese ángulo de mezcla desconocido se denota θ_{13}. Su importancia radica en que, en caso de no ser nulo, abriría las puertas a la posibilidad de medir la violación de la simetría *CP* en el sector leptónico. Este mecanismo constituye una de las claves para entender por qué en los instantes posteriores a la gran explosión (Big Bang) la materia predominó sobre la antimateria y dio lugar al universo que conocemos.

El experimento Double Chooz

En la central nuclear francesa de Chooz se está llevando a cabo un experimento, Double Chooz, cuyo objetivo principal consiste en medir el ángulo de mezcla θ_{13} a partir del flujo de antineutrinos electrónicos generados en los reactores. Debido a las continuas desintegraciones beta de los productos de fisión, el flujo de antineutrinos es muy elevado: se producen unos $16 \cdot 10^{20}$ por segundo. Ello compensa la bajísima probabilidad de detectarlos. Dado que la energía media de estas partículas es de unos 4 megaelectronvoltios, la probabilidad de que oscilen tras haber recorrido pocos kilómetros depende solo de θ_{13}.

Double Chooz cuenta con dos detectores idénticos, situados, respectivamente, a 400 y 1050 metros de los reactores de Chooz. El detector cercano mide el flujo en un lugar en el que no hay oscilación, mientras que el lejano lo hace en uno en el que la oscilación es máxima (en el caso de que θ_{13} no sea cero). El efecto de dicha oscilación se observa en el detector lejano como un déficit de neutrinos con respecto a los detectados por su compañero: al convertirse los antineutrinos electrónicos en antineutrinos de otra familia, no dejan huella en el detector.

Los detectores de Double Chooz contienen líquido centellador de diferentes características en dos vasijas concéntricas. Los neutrinos interaccionan con los protones del líquido, lo que libera energía que se transforma en luz como consecuencia de las propiedades centelladoras del líquido. Esa luz es capturada por los «ojos» del detector (390 fotomultiplicadores) y transformada en corriente eléctrica, a partir de la cual se deduce la energía original del neutrino. Ello permite reconstruir su espectro energético.

Double Chooz se encuentra ahora en su primera fase. El detector lejano se halla operativo desde la primavera de 2011; el cercano se encuentra aún en construcción. La segunda fase del experimento, en la que ambos detectores tomarán datos, comenzará a finales de 2012. Pese a que la máxima sensibilidad a θ_{13} se alcanzará entonces, existe la posibilidad de medir este ángulo de mezcla durante la primera fase si su valor es suficientemente elevado.

El pasado mes de junio, el experimento japonés T2K, que estudia los neutrinos generados con un acelerador de partículas, halló indicios que apuntaban a un valor de θ_{13} distinto de cero. En caso de confirmarse, Double Chooz se encontraría ante las puertas de uno de los descubrimientos más importantes en física de partículas de los últimos años.

—*Inés Gil Botella, Pau Novella Garijo*
y Marcos Cerrada Canales
Departamento de investigación básica
CIEMAT, Madrid



Gong galáctico: El disco de la Vía Láctea presenta un cierto alabeo. Este no se considera estático, sino una onda que se propaga con lentitud, al igual que las vibraciones de un gong gigantesco. Dichas oscilaciones podrían deberse a una perturbación en la materia oscura de nuestra galaxia provocada por dos galaxias satélite.



ASTROFÍSICA

EL LADO OSCURO DE LA VÍA LÁCTEA

Gracias a la materia oscura, resulta posible explicar algunos detalles de la morfología de la Vía Láctea y esbozar una solución al problema de las galaxias satélite

DON DIXON

Leo Blitz

Leo Blitz es astrofísico y profesor en la Universidad de California en Berkeley. Ha sido director del Laboratorio de Astronomía en Radio de dicha universidad.



Los astrónomos hemos tardado un tiempo en darnos cuenta de la importancia que reviste la materia oscura para explicar numerosas características del universo. En mi caso, ello sucedió durante mi primer proyecto posdoctoral, en la Universidad de California en Berkeley. En 1978, medí las velocidades de rotación de nubes moleculares gigantes situadas en los confines de nuestra galaxia y que albergaban estrellas en formación. Tras emplear el método más preciso de la época, me dispuse a representar sus velocidades, a mano y en papel cuadriculado. Me encontraba en el salón del departamento de astronomía cuando otros dos expertos en la Vía Láctea, Frank Shu e Ivan King, pasaron por allí. Me observaron mientras añadía los datos de las nubes más remotas. La forma del gráfico nos dejó completamente claro que la Vía Láctea se hallaba repleta de materia oscura, especialmente en su parte más externa. Permanecimos allí un buen rato, rascándonos la cabeza e intentando imaginar la naturaleza de aquella sustancia misteriosa; pero, al poco, todas las ideas que se nos vinieron a la mente se mostraron equivocadas.

Ese estudio fue uno de los muchos que, durante los años setenta y ochenta del siglo pasado, obligó al gremio a concluir que la materia oscura (una sustancia que no emite ni absorbe luz y que solo se manifiesta a través de su influencia gravitatoria) no solo existe, sino que da cuenta de la mayor parte de la materia del universo. Las recientes medidas del satélite WMAP confirman que la cantidad de materia oscura quintuplica a la de materia ordinaria (protones, neutrones, electrones, etcétera); sin embargo, su naturaleza permanece tan desconocida como el primer día. Una medida de nuestra ignorancia la apreciamos en el hecho de que, según la hipótesis más conservadora, la materia oscura se compone de alguna partícula exótica, predicha por ciertas teorías físicas aún por verificar y que jamás ha sido detectada en los aceleradores. La hipótesis más radical introduce incómodas modificaciones en la ley de la gravedad de Newton y en la teoría de la relatividad general de Einstein.

Con independencia de su naturaleza, la materia oscura proporciona las claves para desentrañar algunos de los problemas que, durante largo tiempo, han traído de cabeza a los expertos en la Vía Láctea. Desde hace más de cincuenta años, se sabe que el exterior de nuestra galaxia se encuentra curvado, como si se tratase de un disco de vinilo que alguien ha olvidado sobre un radiador. Hasta que no se tuvieron en cuenta los efectos de la materia oscura, nadie había logrado formular un modelo satisfactorio de ese alabeo.

Por otro lado, las simulaciones numéricas de formación de galaxias basadas en las propiedades que se esperan de la materia oscura indican que la Vía Láctea debería hallarse rodeada por cientos, si no miles, de pequeñas galaxias satélite. Hasta hace poco apenas se conocían una veintena, lo que ha llevado a muchos a cuestionarse si la materia oscura en realidad posee las propiedades que habitualmente se le asignan [*véase* «Galaxias enanas y materia oscura», por P. Kroupa y M. Pawlowski; Inves-

EN SÍNTESIS

La materia oscura constituye uno de los grandes misterios científicos de nuestra época. Sin embargo, una vez aceptada su existencia, numerosos enigmas cósmicos se dejan explicar con naturalidad.

La materia oscura podría dar cuenta de un alabeo muy pronunciado que exhibe el exterior del disco galáctico. Las galaxias satélite de la Vía Láctea actuarían como un mazo, cuyo efecto se vería amplificado por el halo de materia oscura.

Otra cuestión abierta es por qué la Vía Láctea aparenta tener menos galaxias satélite de las que debería. Puede que estén ahí, pero que se compongan casi solo de materia oscura, por lo que su detección revestiría grandes dificultades.



La Gran Nube de Magallanes: **La mayor galaxia satélite de la Vía Láctea podría estar «batiendo» la materia oscura que rodea nuestra galaxia.**

CORTESÍA DE ECKHARD SLAWIK

tigación y Ciencia, marzo de 2011]. Durante los últimos años, varios grupos han descubierto un filón de galaxias enanas, lo que reduce la discrepancia entre teoría y observaciones. Estos nuevos satélites no solo nos están ayudando a aclarar uno de los viejos misterios de la estructura galáctica, sino que nos informan sobre el inventario total de materia en el universo.

DESCOMPONER EL ALABEO

El primer paso para entender qué información nos puede aportar la materia oscura acerca de la Vía Láctea consiste en elaborar un esquema sobre el modo en que se organiza la galaxia. La materia ordinaria (las estrellas y el gas) reside en cuatro estructuras principales: un disco delgado (que incluye los brazos espirales, en uno de los cuales se halla el Sol), un núcleo denso (que alberga un agujero negro supermasivo), un bulbo alargado, o barra, y, por último, un halo esferoidal de estrellas viejas y cúmulos estelares que envuelve al conjunto. La materia oscura exhibe una disposición muy diferente. Aunque no podemos verla, resulta posible inferir su distribución a partir de las velocidades de rotación de las estrellas y el gas. El efecto gravitatorio que ejerce la materia oscura sobre la visible indica que aquella se reparte de forma aproximadamente esférica y que se extiende mucho más allá del halo estelar. Su densidad es máxima en el centro y, a medida que nos alejamos de él, disminuye con el cuadrado de la distancia. Semejante disposición obedece a lo que los expertos denominan ensamblaje jerárquico: la idea de que las galaxias de gran tamaño, como la Vía Láctea, se formaron a partir de la fusión de otras más pequeñas.

Durante años, resultó imposible obtener una descripción del halo de materia oscura más elaborada que la de una bola gigante, indiferenciada y compuesta de un material desconocido. Sin embargo, en los últimos años se han vislumbrado algunos detalles que revelan que la materia oscura se muestra bastante más interesante de lo que sospechábamos. En concreto, varios estudios independientes apuntan a una distribución no uniforme, sino rugosa y con subestructuras a distintas escalas.

Tales irregularidades justificarían tanto la existencia como la magnitud del alabeo de la Vía Láctea. Este consiste en una deformación muy particular que nuestra galaxia exhibe en la parte externa del disco. A distancias de más de 50.000 años luz del centro galáctico, el disco contiene muy pocas estrellas y se compone casi exclusivamente de gas de hidrógeno atómico. Sin embargo, este gas no se halla confinado en el plano galáctico; de hecho, cuanto más nos alejamos, más se desvía de este. A una distancia de unos 75.000 mil años luz, el disco se comba unos 7500 años luz fuera del plano.

A medida que el gas gira alrededor del centro galáctico, también oscila hacia arriba y abajo, con lo que entra y sale del plano. Estas oscilaciones se suceden cada varios cientos de millones de años, de modo que lo que observamos ahora viene a ser como una instantánea de un momento particular del ciclo. El disco gaseoso se comporta como un gong gigante que vibrase a cámara lenta. Al igual que el instrumento musical, también el

Alabeo galáctico

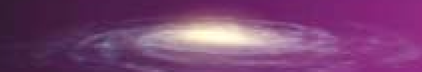
El disco de la Vía Láctea, de proporciones casi circulares, es la región donde se encuentra la mayor parte del gas y las estrellas. En sus regiones externas muestra un abarquillamiento para el que hasta hace poco carecíamos de explicación satisfactoria.

Poner al día una vieja hipótesis

Durante los años cincuenta del siglo XX, se atribuyó el alabeo a la atracción gravitatoria ejercida por dos galaxias enanas satélites de la Vía Láctea, las Nubes de Magallanes. Sin embargo, estas resultan demasiado pequeñas como para deformar el disco galáctico. Hoy sabemos que la parte visible de la Vía Láctea se encuentra rodeada de un enorme halo casi esférico de materia oscura. Esta amplificaría el efecto de «martillo» de las Nubes de Magallanes, lo que daría cuenta del alabeo observado.

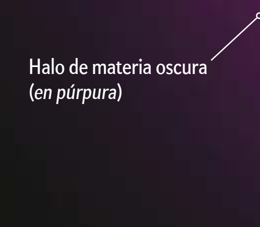
Sol

Imagen clásica de la Vía Láctea



Las Nubes de Magallanes explican parte del alabeo





Halo de materia oscura (*en púrpura*)

Como una barca en un lago, las Nubes de Magallanes dejan una estela en la materia oscura a medida que la atraviesan. La perturbación gravitatoria resultante induce lentas oscilaciones y comba el disco.

Escala vertical exagerada



Vibrando como un gong
El abarquillamiento que vemos hoy sería, en realidad, una instantánea de un movimiento ondulatorio. La onda que recorre la Vía Láctea posee tres modos normales, el equivalente a las notas con las que puede sonar un tambor. La gravedad de las Nubes de Magallanes, amplificada por la materia oscura, hace las veces de mazo de percusión.

DON DIXON; FUENTE: GYULA JÓZSA (*alabeo*)

disco galáctico vibra con diferentes frecuencias o «notas», cada una de las cuales se corresponde con la geometría que adopta la superficie al oscilar. En 2005, mis colaboradores y yo demostramos que el alabeo de la Vía Láctea puede expresarse como la superposición de tres de esas notas (la de frecuencia inferior se encuentra 64 octavas por debajo del do central de un piano). El resultado neto es asimétrico: en un lado de la galaxia, el gas se aleja mucho más del plano que en el opuesto.

Cuando los radioastrónomos descubrieron ese abarquillamiento durante los años cincuenta, creyeron que se debía a los efectos gravitatorios ejercidos por las Nubes de Magallanes, las galaxias satélite de mayor tamaño que orbitan en torno a la Vía Láctea. Puesto que sus trayectorias discurren fuera del plano galáctico, su gravedad tiende a distorsionar el disco. No obstante, un cálculo detallado muestra que dicha interacción no alcanza para explicar el alabeo observado, ya que el tamaño de las Nubes de Magallanes resulta insignificante en comparación con el de la Vía Láctea. Durante décadas, la razón de la pronunciada curvatura que exhibe nuestra galaxia ha permanecido oculta.

MAZOS OSCUROS

El reconocimiento de la presencia de materia oscura en la Vía Láctea, unido a nuevas estimaciones al alza sobre la masa de las Nubes de Magallanes, suscitó una propuesta alternativa. Si el disco de gas se comportaba como un gigantesco gong, quizá la órbita de las nubes a través del halo de materia oscura actuase como un mazo de percusión. Las nubes golpearían el disco, pero no de manera directa. La trayectoria de las nubes genera una estela en la materia oscura, similar a la que una barca deja sobre el agua. Ello produce irregularidades en la distribución de materia oscura que, a su vez, harían resonar las regiones externas y poco masivas del disco. Aunque, por sí solas, las Nubes de Magallanes resultan insignificantes, la materia oscura amplifica sus efectos de manera considerable.

La idea fue propuesta en 1998 por Martin D. Weinberg, de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Algo después, él y yo la aplicamos a las observaciones de la Vía Láctea y descubrimos que podían reproducirse los tres patrones de vibración observados en el disco de gas. En caso de resultar correcta, la teoría predice que el alabeo constituye un rasgo dinámico de la galaxia, cuya geometría cambiaría sin cesar a medida que se desplazan las Nubes de Magallanes. La forma de la Vía Láctea no estaría fija, sino en perpetuo movimiento.

Ese abarquillamiento no supone la única asimetría de la Vía Láctea. Una de las más espectaculares se observa en el espesor de las regiones más externas del disco de gas. Si consideramos la línea imaginaria que pasa por el Sol y por el centro de la galaxia, vemos que, en promedio, el grosor de la capa de gas a un lado dobla al del opuesto. Semejante asimetría debería ser inestable y desaparecer por sí sola. Por tanto, su persistencia requiere que algún mecanismo externo la mantenga. Aunque los astrónomos cobraron consciencia del problema hace unos treinta años, durante largo tiempo lo barrieron debajo de la alfombra. La cuestión fue ignorada hasta hace poco, cuando datos mucho más precisos sobre el hidrógeno atómico de la Vía Láctea y una comprensión más profunda de los movimientos no circulares del gas hicieron imposible seguir dando la espalda al problema.

Las dos hipótesis principales se basan en la materia oscura. La primera propone que la Vía Láctea es esférica, pero no concéntrica con el halo de materia oscura. De acuerdo con la segunda, postulada por Kanak Saha, del Instituto Max Planck de

Física Extraterrestre de Garching, y sus colaboradores, también el halo de materia oscura exhibiría una cierta asimetría. Ambas posibilidades cuestionan las antiguas ideas sobre la formación de la Vía Láctea, según las cuales esta y el halo de materia oscura se habrían formado a la vez, a partir de la condensación de una nube gigantesca de material. De ser así, las distribuciones de materia ordinaria y de materia oscura compartirían un mismo centro. Por el contrario, la asimetría indica que la galaxia nació a partir de la fusión de entidades menores, o bien que creció gracias a la fusión o acreción continua de gas intergaláctico, procesos que no tienen por qué exhibir simetría alguna. El centro de la galaxia podría encontrarse desplazado con respecto al del halo oscuro, ya que el gas, las estrellas y la materia oscura se comportan de manera diferente.

Una forma de verificar la idea consiste en estudiar las largas corrientes de estrellas que se extienden por los confines de la galaxia, formaciones que constituyen los restos de antiguas galaxias satélite. Las galaxias enanas más comunes en torno a la Vía Láctea son las enanas esferoidales, llamadas así en razón de su aspecto redondeado y su baja masa en estrellas, diez mil veces menor que la de la Vía Láctea. Con el tiempo, los satélites se ven afectados por las fuerzas de marea de la Vía Láctea, las mismas que la Luna ejerce sobre la Tierra y que deforman las grandes masas de agua. A las galaxias enanas les ocurre algo parecido y se van desgarrando hasta que quedan reducidas a una banda muy fina [*véase* «La huella de galaxias destruidas», por R. Ibata y B. Gibson; Investigación y Ciencia, junio de 2007].

Dado que esos regueros de estrellas se encuentran a grandes distancias del centro de la Vía Láctea, donde los efectos gravitatorios de la materia oscura se tornan importantes, su forma permite inferir la geometría del halo. Si este no es esférico, sino achatado, deformará el rastro de estrellas, que se desviará de manera apreciable de un gran círculo. Las corrientes observadas se muestran muy delgadas y describen órbitas casi circulares. Al respecto, las simulaciones numéricas realizadas por Rodrigo Ibata, del Observatorio Astronómico de Estrasburgo, y sus colaboradores sugieren que la distribución de materia oscura es aproximadamente esférica, si bien no excluyen la configuración asimétrica propuesta por el grupo de Saha.

GALAXIAS DESAPARECIDAS

Si la destrucción de las galaxias enanas suscita numerosas preguntas, no son menos las que plantea su formación. En los modelos actuales, las galaxias comienzan su andadura como agrupaciones de materia oscura, las cuales van acumulando gas y estrellas hasta que se forma su parte visible. El proceso no solo da lugar a grandes galaxias, sino también a numerosas enanas. Aunque los modelos reproducen relativamente bien sus propiedades, predicen muchas más de las que se observan. ¿Reside el problema en los modelos o en las observaciones?

Parte de la respuesta la ha proporcionado el Sondeo Digital del Cielo Sloan, un proyecto para cartografiar de manera sistemática una cuarta parte del cielo. El muestreo ha hallado una docena de nuevas galaxias muy tenues alrededor de la Vía Láctea. Se trata de un descubrimiento asombroso: el cielo se ha observado con tanto detalle y durante tanto tiempo que resulta difícil imaginar cómo galaxias tan cercanas a nosotros podían haber pasado desapercibidas. En ocasiones, estos satélites ultradébiles apenas contienen pocos cientos de estrellas. Se muestran tan oscuros y difusos que su detección requiere técnicas especiales de análisis de datos.

Si el catálogo Sloan hubiera abarcado todo el cielo, se calcula que habría descubierto unas treinta y cinco galaxias ultradébiles más. Sin embargo, estas tampoco darían cuenta de todas las enanas que faltan, por lo que han comenzado a considerarse otras posibilidades. Por ejemplo, puede que existan más galaxias de ese tipo, pero demasiado lejos como para detectarlas. El muestreo Sloan ha localizado enanas ultradébiles hasta una distancia de unos 150.000 años luz. Erik Tollerud y sus colaboradores, de la Universidad de California en Irvine, sostienen que podría haber hasta 500 galaxias por descubrir orbitando a distancias de hasta un millón de años luz del centro de la Vía Láctea. Estos objetos deberían ser detectables por el Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos (Large Synoptic Survey Telescope), cuya construcción comenzó el pasado mes de marzo.

Según otra hipótesis, la Vía Láctea se encontraría rodeada de galaxias aún más débiles que las enanas ultradébiles; tan oscuras que quizá no contengan ni una sola estrella. La posibilidad de detectar tales objetos depende de si, además de materia oscura, contienen gas o no. Este se hallaría tan difuso que se enfriaría muy despacio, demasiado como para haber engendrado estrellas. Con todo, algunos radiotelescopios quizá podrían detectarlo.

Una pequeña galaxia hecha de materia oscura podría estar atravesando la Vía Láctea en estos momentos

Si esas galaxias carecieran de gas, aún podrían revelar su presencia por medio de sus efectos gravitatorios sobre la materia ordinaria. Si una de ellas se zambullese a través del disco de la Vía Láctea, dejaría una huella similar a la de un guijarro sobre la superficie de un estanque: una perturbación en la distribución o en las velocidades de las estrellas y el gas. Por desgracia, tales indicios serían muy tenues y habría que asegurarse de que no admiten ninguna otra explicación. Una ardua tarea, si tenemos en cuenta que todas las galaxias espirales presentan perturbaciones en sus discos de hidrógeno análogas a las olas de mar gruesa.

Para una galaxia oscura lo bastante masiva, un método desarrollado por Sukanya Chakrabarti, ahora en la Universidad Atlántica de Florida, y varios colaboradores, entre los que me incluyo, podría proporcionar las herramientas necesarias para percibir el tránsito. Hace poco demostramos que, a menudo, las distorsiones más acusadas en la parte exterior de las galaxias son causadas por interacciones de marea con otras galaxias, lo que permite distinguirlas de otros tipos de perturbaciones. Al analizarlas, pueden calcularse tanto la masa como la localización de la galaxia intrusa. La técnica logra discernir galaxias hasta mil veces menos masivas que la galaxia principal. Tras aplicar este método a la Vía Láctea, nuestro equipo concluyó que una nueva galaxia, posiblemente oscura, se escondería en el plano de la Vía Láctea, a unos 300.000 años luz de su centro. Los planes para avistar este objeto en el infrarrojo cercano con el Telescopio Espacial Spitzer ya están en marcha.

MUY POCA LUZ

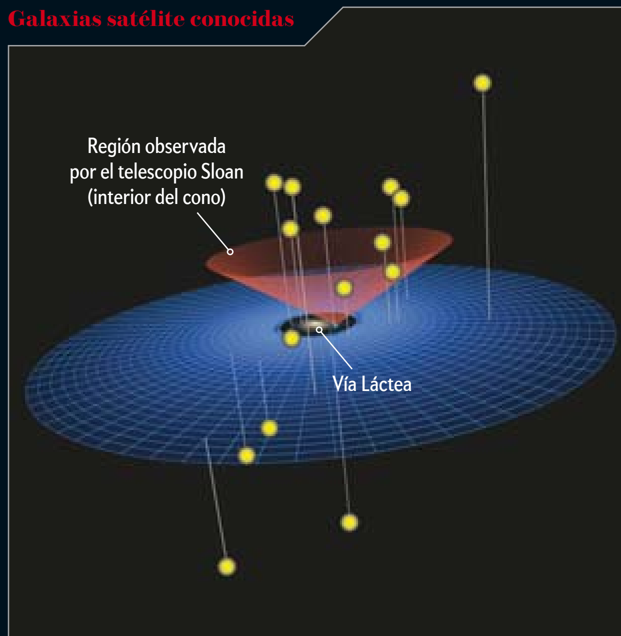
Aparte de la dificultad que reviste encontrarlas, las galaxias ultradébiles y las galaxias oscuras cercanas a la Vía Láctea plantean otro interrogante aún más profundo. La cantidad de ma-

UN MISTERIO CASI RESUELTO

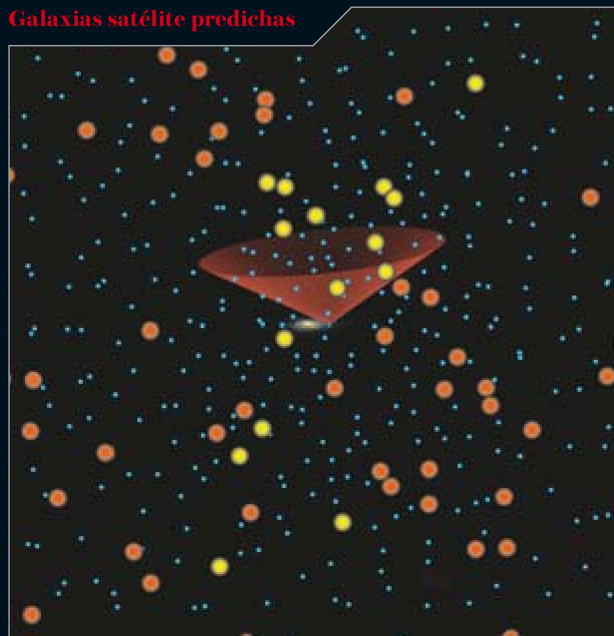
Las ovejas descarriadas de la familia galáctica

En teoría, la Vía Láctea debería contar con un nutrido enjambre de galaxias satélite orbitando a su alrededor. Sin embargo, durante largo tiempo, los astrónomos no habían hallado más de una docena. Observaciones recientes, basadas en el Sondeo Digital del Cielo Sloan, han recortado la diferencia al descubrir nuevos satélites compuestos casi exclusivamente de materia oscura. (Las posiciones de los satélites hipotéticos de la figura son esquemáticas; tan solo reflejan su distribución global).

Galaxias satélite conocidas



Galaxias satélite predichas



Satélites conocidos · Satélites débiles predichos · Satélites oscuros predichos

teria de una galaxia suele expresarse en términos de su relación entre masa y luminosidad: la masa del material que contiene dividida entre la cantidad de luz que desprende. Por lo general, ese cociente se formula en unidades solares, en las que el Sol, por definición, cuenta con una relación igual a uno. En nuestra galaxia, la estrella promedio es algo menos masiva que el Sol y mucho menos brillante, de forma que su cociente global es aproximadamente igual a 3. Al incluir la materia oscura, la relación entre masa y luminosidad total de la Vía Láctea asciende a 30.

Josh Simon, en la actualidad en el Instituto Carnegie de Washington, y María Geha, de la Universidad de Yale, midieron las velocidades de las estrellas de ocho enanas ultradébiles para obtener la masa y la luminosidad de esas galaxias. Sus cocientes superaban en algunos casos el valor 1000, muchísimo más que cualquier otra estructura conocida. Para el universo en su conjunto, la cantidad de materia oscura quintuplica a la de materia ordinaria. ¿Por qué, en el caso de la Vía Láctea, el cociente entre masa y luminosidad es mucho mayor, y en las galaxias ultradébiles, aún más?

El origen de la discrepancia puede hallarse en el numerador o en el denominador: las galaxias con relaciones entre masa y luminosidad más elevadas que el promedio cósmico, o bien poseen más masa de lo esperado, o bien emiten menos luz. Se sospecha que el error se halla en el denominador. Una cantidad inmensa de materia ordinaria podría no radiar lo bastante como para ser vista si nunca ha sido capaz de asentarse en una galaxia y formar estrellas, o si llegó a instalarse en la galaxia pero fue despedida de nuevo al medio intergaláctico, donde permanece en un estado ionizado por debajo del umbral de detección de los telescopios actuales [*véase* «En busca de las galaxias perdidas», por James E. Geach; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2011]. Las galaxias más pequeñas, con una gravedad menor, pierden más gas y su emisión luminosa es menor de lo esperado. Resulta irónico que los problemas planteados por un tipo de materia invisible, la materia oscura, den lugar a otro, el de la materia ordinaria no detectada.

El enigma de la materia oscura, latente durante tantos años, constituye hoy en día uno de los campos de investigación más activos en física y en astronomía. Mientras los físicos esperan detectar e identificar la partícula que compone esta sustancia misteriosa, los astrónomos buscan indicios de su comportamiento. Pero, a pesar sus enigmas, la materia oscura ha logrado explicar un amplio abanico de fenómenos astronómicos.

FUENTE: JAMES BULLOCK, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, IRVINE (*satélites conocidos*)

PARA SABER MÁS

A magellanic origin for the warp of the galaxy. Martin D. Weinberg y Leo Blitz en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 641, n.º 1, págs. L33-L36, 10 de abril de 2006. **arxiv.org/abs/astro-ph/0601694**

The vertical structure of the outer Milky Way H I disk. E. S. Levine, Leo Blitz y Carl Heiles en *The Astrophysical Journal*, vol. 643, n.º 2, págs. 881-896, 1 de junio de 2006. **arxiv.org/abs/astro-ph/0601697**

Finding dark galaxies from their tidal imprints. Sukanya Chakrabarti, Frank Bigiel, Philip Chang y Leo Blitz, aceptado para su publicación en *The Astrophysical Journal*. **arxiv.org/abs/1101.0815**



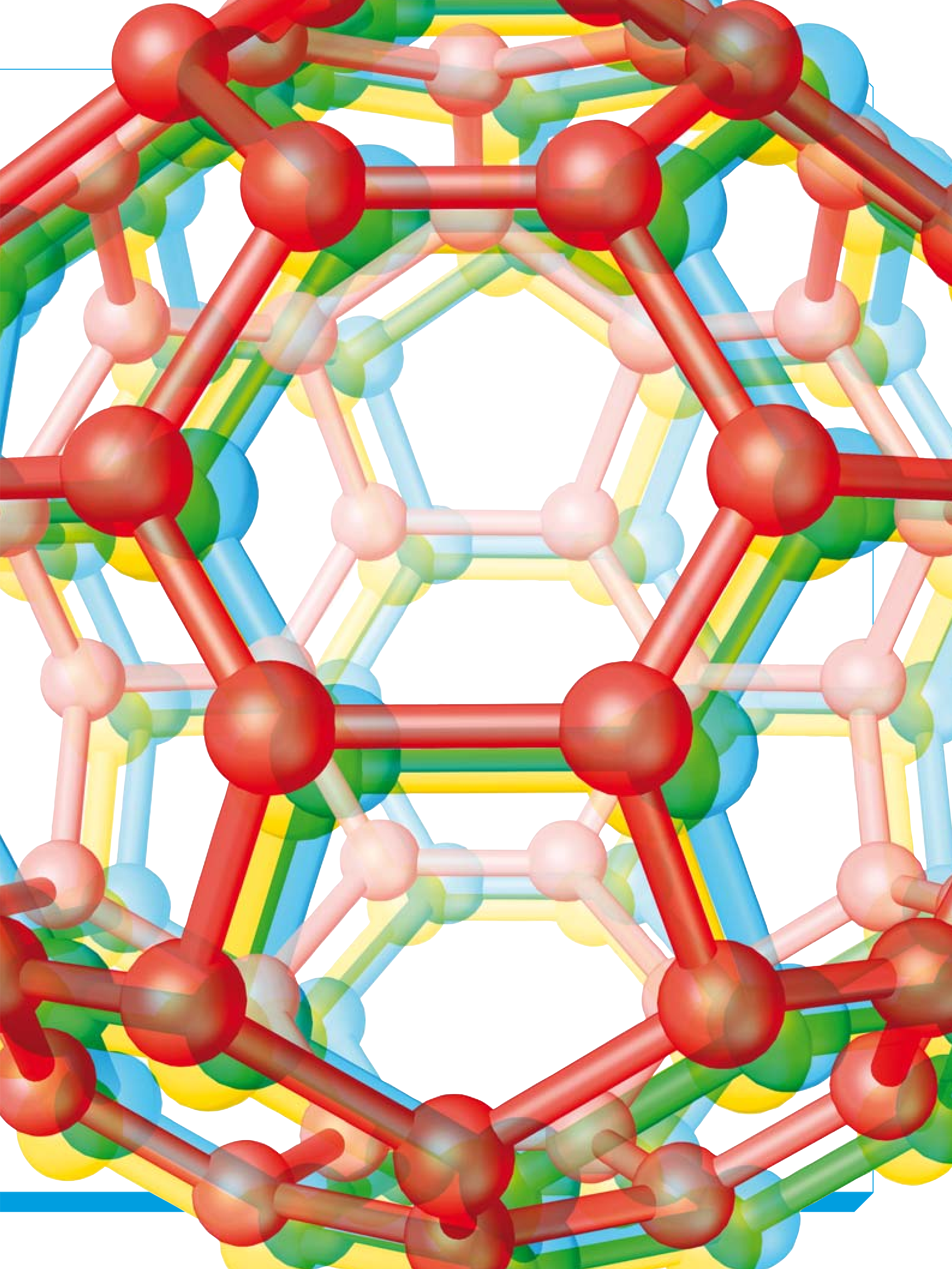
GEORGE RETSECK

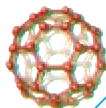
2011, AÑO INTERNACIONAL DE LA QUÍMICA

Una celebración en reconocimiento a los hallazgos y al enorme potencial de esta ciencia

La opinión popular de que la química es hoy una ciencia bien comprendida en sus aspectos conceptuales, y que basta con aplicarlos, resulta errónea. Sin duda, la inmensa mayoría de los productos que utilizamos en nuestra vida diaria existen gracias a la química moderna. Pero la producción de compuestos útiles dista de ser la única tarea de los químicos. Muchos de los problemas más acuciantes de la modernidad —desde reducir la contaminación de los vehículos, hasta reconducir el destino de las células vivas— constituyen, en el fondo, problemas de naturaleza química. Harán falta químicos para resolverlos. Lo mismo sucederá para algunos de los enigmas más fundamentales de la ciencia.

El Año Internacional de la Química, proclamado por las Naciones Unidas, tiene por lema «La química: nuestra vida, nuestro futuro». A través de un amplio repertorio de actividades se ha celebrado en todo el mundo. También en nuestras páginas. A lo largo del 2011, los contenidos relacionados con el desarrollo y las aplicaciones de la química han cobrado mayor protagonismo en Investigación y Ciencia. Para cerrar este año de celebraciones, presentamos a continuación diez cuestiones pendientes, en su esencia de carácter químico, y describimos el sorprendente rol de las señales moleculares en las interacciones humanas. Un pequeño dossier que pone de manifiesto el alcance y la influencia de la química en nuestras vidas.





Philip Ball es doctor en física por la Universidad de Bristol. Fue editor de *Nature* durante más de 20 años. Ha escrito numerosos libros y artículos de divulgación científica.



QUÍMICA

10 ENIGMAS POR RESOLVER

Muchas de las cuestiones científicas de mayor calado y algunos de los problemas más urgentes de la humanidad competen a la ciencia de los átomos y las moléculas

Philip Ball

1 ¿Cómo se originó la vida?

El momento en que surgieron de la materia inanimada los primeros seres vivos, hace casi cuatro mil millones de años, sigue envuelto en el misterio. ¿Cómo se formaron, a partir de unas moléculas sencillas del «caldo primordial», unos compuestos cada vez más complejos? ¿Cómo empezaron algunos de esos compuestos a procesar energía y replicarse (dos de los procesos que definen la vida)? A nivel molecular, estos estadios corresponden sin duda a reacciones químicas, lo que convierte el origen de la vida en un problema de esa ciencia.

Ya no es el momento de ofrecer nuevas conjeturas, más o menos verosímiles, sobre el origen de la vida. De ellas se dispone en abundancia. Se ha especulado que unos minerales arcillosos habrían catalizado la formación de los primeros polímeros autorreplicantes (moléculas que, como el ADN o las proteínas, se hallan constituidas por largas cadenas de unidades menores); que la complejidad química habría sido impulsada por la energía procedente de las fumarolas de los fondos marinos; o sobre un «mundo de ARN» en el que esta molécula, que se asemeja al ADN y puede catalizar reacciones como lo hace una enzima, habría representado una molécula universal antes de la aparición del ADN y de las proteínas.

Ahora se trata de verificar esas ideas en reacciones controladas en el laboratorio. Se ha comprobado que ciertos compuestos sencillos pueden reaccionar de modo espontáneo y formar las estructuras más complejas propias de los sistemas vivos, como los aminoácidos y los nucleótidos, las unidades elementales que integran el ADN y el ARN. Un equipo dirigido por John Sutherland, actualmente en el Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica (MRC) del Reino Unido, demostró en 2009 la formación de nucleótidos a partir de moléculas que probablemente existieron en el caldo primordial. Otros investigadores se han centrado en la capacidad de algunos filamentos de ARN para actuar a modo de enzimas, dato que respalda la hipótesis sobre un «mundo de ARN». Avances como estos permitirían cerrar poco a poco la brecha que me-

dia entre la materia inanimada y los sistemas autorreplicantes y autónomos.

Hoy se posee una visión más clara del los remotos ambientes de nuestro sistema solar, tal vez fértiles (flujos de agua ocasionales en Marte, mares petroquímicos en Titán, uno de los satélites de Saturno, o mares gélidos y salados que al parecer acechan bajo los hielos de Europa y Ganímedes, satélites de Júpiter), por lo que el origen de la vida terrestre representa solo una parte de otras preguntas más amplias: ¿en qué circunstancias puede surgir vida? ¿Hasta qué punto varía su base química? La cuestión se ha vuelto aún más apasionante tras el descubrimiento, en los 16 últimos años, de más de 500 planetas extrasolares, otros mundos de pasmosa diversidad.

Esos hallazgos han obligado a plantear ideas más osadas sobre los posibles sistemas químicos que sostienen la vida. La NASA ha defendido durante tiempo que la presencia de agua líquida constituía una condición sine qua non para la existencia de vida, pero ahora han surgido dudas al respecto. ¿No podrían servir el amoníaco líquido, la formamida, algún disolvente oleoso, como el metano líquido, o quizás el hidrógeno en estado supercrítico de Júpiter? ¿Y por qué habría la vida de restringirse al ADN, el ARN y las proteínas? Se han construido ya varios sistemas químicos artificiales que exhiben una suerte de replicación a partir de sus componentes, sin concurso de ácidos nucleicos. Todo cuanto se requiere, al parecer, es un sistema molecular que sirva de plantilla para hacer una copia de sí misma que después se separe de ella.

Según el químico Steven Benner, de la Fundación para la Evolución Molecular Aplicada, en Gainesville, cuando estudiamos la vida en la Tierra no tenemos forma de saber si las semejanzas entre seres, fundadas en los ácidos nucleicos y las proteínas, son reflejo de ancestros comunes, o si constituyen necesidades universales para la vida. El científico añade que ese enigma debe motivar el avance de las investigaciones.

2 ¿Cómo se forman las moléculas?

Las estructuras moleculares continuarán formando parte de las clases de ciencias en bachillerato, pero su imagen familiar, a base de bolas que representan átomos y varillas de enlace entre ellas, corresponde tan solo a un símil. Sin embargo, aún no existe un acuerdo sobre una representación más precisa de las moléculas.

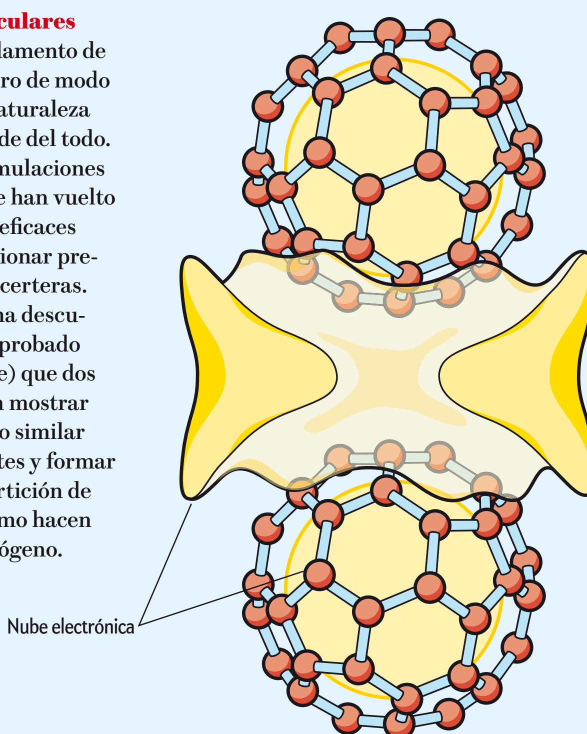
En los años veinte del siglo xx, los físicos Walter Heitler y Fritz London mostraron cómo describir un enlace químico valiéndose de las ecuaciones de la entonces naciente teoría cuántica. Por otro lado, el químico Linus Pauling propuso que los enlaces se formaban por superposición en el espacio de los orbitales electrónicos de átomos distintos. Una teoría rival, planteada por Robert Mulliken y Friedrich Hund, sugería que los enlaces resultaban de la fusión de orbitales atómicos en «orbitales moleculares» que se extendían sobre más de un átomo. La química teórica parecía a punto de convertirse en una rama de la física.

Casi cien años después, la concepción molecular orbital es la más aceptada, pero no todos concuerdan en que represente la mejor forma de entender las moléculas. Ello se debe a que este modelo de molécula, y también los demás, se basan en hipótesis simplificadoras, por lo que no dejan de ser descripciones parciales y aproximadas. En realidad, una molécula consiste en un racimo de núcleos atómicos inmersos en una nube de electrones, con fuerzas electrostáticas que compiten entre sí en un continuo tira y afloja, y en el que todos los componentes se hallan en incesante movimiento y reorganización. Los modelos actuales de la molécula aspiran a plasmar tan dinámica entidad en una estructura estática que, si bien pueda captar algunas de sus propiedades más notorias, por fuerza prescindirá de otras.

Hoy por hoy, la teoría cuántica no ofrece una definición unívoca de enlace químico acorde con la intuición de los que dedican sus investigaciones a crearlo o romperlo. Existen en la actualidad numerosas formas de describir las moléculas como átomos vinculados por enlaces. Según el químico cuántico Dominik Marx, de la Universidad del Ruhr, en Bochum, muchas de tales descripciones «resultan útiles en ciertos casos, pero fallan en otros». [*Véase* «Tras el enlace», por Philip Ball; Investigación y Ciencia, septiembre de 2011.]

Las simulaciones informáticas permiten ahora calcular con gran precisión las estructuras y propiedades de las moléculas a partir de primeros principios cuánticos... siempre que el número de electrones se mantenga pequeño. «La química computacional puede lograr niveles de máxima complejidad y realismo», afirma Marx. Por consiguiente, los cálculos por ordenador se consideran cada vez más como experimentos virtuales que pronostican el curso de una reacción [*véase* «Dulces misterios de la naturaleza», por Carme Rovira y Albert Ardèvol, *en este mismo número*]. Pero en cuanto la reacción implica más de dos o tres docenas de electrones, el peso de los cálculos no tarda en

Los enlaces moleculares constituyen el fundamento de toda la química, pero de modo sorprendente, su naturaleza aún no se comprende del todo. No obstante, las simulaciones computacionales se han vuelto lo suficientemente eficaces como para proporcionar predicciones bastante certeras. Gracias a ellas, se ha descubierto (y se ha comprobado experimentalmente) que dos buckybolas pueden mostrar un comportamiento similar al de átomos gigantes y formar enlaces por compartición de electrones, tal y como hacen dos átomos de hidrógeno.



BROWN BIRD DESIGN

abrumar al más potente ordenador. El reto consiste en ver si será posible aumentar de escala y modelizar los complejos procesos moleculares de la célula o los materiales muy complejos.

3 ¿Cómo influye el ambiente sobre nuestros genes?

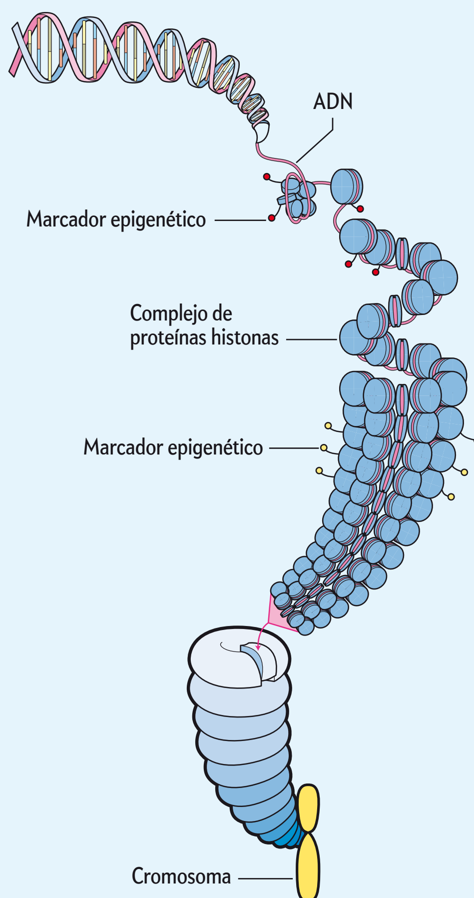
Según la idea clásica de la biología, lo que somos depende de los genes que poseamos. Hoy se sabe además que también depende de los genes concretos que se activen. Y al igual que en todos los procesos biológicos, el meollo de esa cuestión se halla en la química.

Las células embrionarias, en sus primeros estadios, pueden dar origen a cualquier tipo de tejido. Pero conforme el embrión va creciendo, estas células madre pluripotentes se van diferenciando y especializando en distintas funciones (como células hemáticas, miocitos o neuronas) que luego transmiten a su progenie. La formación del cuerpo humano estriba en la modificación química de los cromosomas de las células madre, que da lugar a una cierta configuración de genes activados y silenciados.

Uno de los descubrimientos clave sobre la clonación y las células madre es que tal configuración resulta reversible y puede verse afectada por circunstancias externas al organismo. Cuando se diferencian, las células no desactivan los genes de forma permanente. Se limitan a mantener «aptos para el servicio» a los que necesitan. Por el contrario, los genes que han sido «apagados» conservan latente la capacidad de actuación (es decir, de originar las proteínas codificadas por ellos) y pueden reactivarse al exponerlos a ciertas sustancias del entorno.

Una cuestión apasionante constituye la idea de que el control de la actividad génica involucraría fenómenos químicos a escalas muy superiores a las atómicas o moleculares, la llamada mesoescala, en la que interactuarían grandes grupos y ensamblajes moleculares. La cromatina, la mezcla de ADN y proteínas que compone los cromosomas, posee una estructura jerárquica. La doble hélice está arrollada en torno a partículas cilíndricas compuestas por unas proteínas, las histonas, y este rosario de cuentas se halla engavillado después en estructuras de orden superior, por ahora escasamente comprendidas.

Además de los genes, un conjunto de instrucciones determina cuáles de ellos han de activarse en la célula. Este código epigenético aporta información mediante compuestos adheridos al ADN o a las histonas, proteínas sobre las que se arrolla el ADN en los cromosomas. Los marcadores químicos ayudan a establecer si un gen se halla escondido en una parte sumamente condensada de los cromosomas o si se encuentra accesible para su transcripción.



Las células ejercen un control estricto sobre este empaquetamiento: la forma y el lugar en que un gen está encajado en la cromatina puede determinar que se halle o no activo.

Para modificar la estructura de la cromatina, las células cuentan con unas enzimas especializadas que desempeñan una función muy importante en la diferenciación celular. La cromatina de las células madre embrionarias parece mostrar una estructura mucho más abierta y laxa, pero conforme van quedando inactivos ciertos genes, se torna más grumosa y organizada. «La cromatina parece fijar o estabilizar el estado de la célula», afirma Bradley Bernstein, patólogo del Hospital General de Massachusetts. Lo que es más, tal esculpido de la cromatina va acompañado por la modificación química del ADN y de las histonas. Pequeñas moléculas vinculadas a uno y otras sirven de rótulos que indican a la maquinaria celular que ha de silenciar ciertos genes, o por el contrario, ha de liberarlos para que actúen. Este rotulado se denomina «epigenético» porque no altera la información que portan en sí los genes.

La cuestión de hasta qué punto se puede devolver la pluripotencia a las células maduras (que se comporten de nuevo como células madre), aspecto esencial en la medicina regenerativa, parece depender en gran medida de la posibilidad de eliminar el rotulado epigenético.

Hoy se sabe que, más allá del código genético que dicta las instrucciones a las células, estas se comunican entre sí en un lenguaje químico independiente del genético, el leguaje epigenético. Como explica el genetista Bryan Turner, de la Universidad de Birmingham, se puede tener una predisposición genética a numerosas enfermedades, entre ellas el cáncer, pero el que la enfermedad se manifieste o no dependerá a menudo de factores ambientales que actúan a través de las vías epigenéticas.

4 ¿Cómo piensa y elabora recuerdos el cerebro?

El cerebro es una computadora química. Las interacciones entre las neuronas que componen sus circuitos están mediadas por moléculas, en concreto, por neurotransmisores que atraviesan las sinapsis, los puntos de conexión entre las neuronas. Quizá donde la química de la mente resulta más extraordinaria es en el funcionamiento de la memoria, en que los principios y conceptos abstractos (un número de teléfono o una asociación emoti-

BROWN BIRD DESIGN

va) quedan impresos en estados de la red neuronal mediante señales químicas sostenidas. ¿Qué mecanismo químico crea una memoria a la vez persistente y dinámica, capaz de recordar, enmendar y olvidar?

Hoy podemos responder a una parte de esa pregunta. Una cascada de procesos bioquímicos, que provoca un cambio en la cantidad de neurotransmisores en las sinapsis, permite el aprendizaje de los reflejos habituales. Pero incluso este sencillo aprendizaje tiene estadios de corto y de largo plazo. Mientras tanto, la memoria declarativa, más compleja (el recuerdo de personas o lugares), obedece a un mecanismo y a una ubicación cerebral diferente, y entraña la activación de una proteína, el receptor NMDA, en ciertas neuronas. El bloqueo de este receptor con drogas impide la retención de muchos recuerdos de tal clase.

Nuestra memoria declarativa sobre aspectos de la vida diaria suele quedar codificada mediante la potenciación de largo plazo, un proceso que afecta a los receptores NMDA y que conlleva una ampliación de la región de la sinapsis. Esta ampliación refuerza la conexión entre neuronas vecinas, al aumentar en la unión sináptica la diferencia de potencial inducida por los impulsos nerviosos que llegan a ella. La bioquímica de este proceso ha sido elucidada en los últimos años. Se ha visto que en el seno de la neurona se forman unos filamentos constituidos sobre todo por actina (una proteína del andamiaje básico de la célula y del material que determina su tamaño y forma). Pero dicho proceso puede ser revocado durante un breve tiempo, antes de que el cambio quede consolidado, si ciertos agentes bioquímicos evitan la estabilización de los filamentos recién formados.

Una vez codificada, la memoria a largo plazo de los aprendizajes simples y complejos se mantiene gracias a la activación de unos genes que codifican ciertas proteínas. Parece que en este proceso intervendrían priones, unas proteínas que pueden alternar entre dos conformaciones. Una de ellas es soluble; la otra, insoluble, actúa de catalizador para llevar a otras moléculas como ella al estado no soluble y hacer que se agreguen. El descubrimiento de los priones se debió a su papel en enfermedades neurodegenerativas, como el mal de las vacas locas, pero se ha observado ahora que los priones ejercen también funciones beneficiosas: la formación de un agregado priónico marca a una sinapsis concreta para que retenga un recuerdo.

Todavía hay grandes enigmas acerca del funcionamiento de la memoria, muchos de los cuales se resolverán cuando se conozcan ciertos detalles químicos. Por ejemplo, ¿cómo se recupera un recuerdo una vez almacenado? «Se trata de un misterio cuyo análisis acaba de empezar», afirma Eric Kandel, neurocientífico de la Universidad de Columbia galardonado con un premio Nobel.

El estudio de la química de la memoria abre la posibilidad, a la vez atrayente y controvertida, de aumentar su capacidad mediante fármacos. Se conocen ya algunas sustancias que refuerzan la memoria, entre ellas, hormonas sexuales y compuestos sintéticos que actúan sobre los receptores de nicotina, glutamato, serotonina y otros neurotransmisores. De hecho, según el neurobiólogo Gary Lynch, de la Universidad de California en Irvine, la compleja secuencia que sustenta el aprendizaje y la memoria de larga duración hace suponer la existencia numerosas dianas para tales sustancias.

5 ¿Cuántos elementos existen?

Las tablas periódicas de los textos escolares han de revisarse constantemente, ya que el número de elementos no deja de aumentar. Si se hace colisionar núcleos atómicos mediante aceleradores de partículas, se pueden crear elementos «superpesados» cuyos núcleos poseen más protones y neutrones que los 92 elementos descubiertos en la naturaleza. Esos enormes núcleos no son muy estables y se descomponen radiactivamente, a menudo en una ínfima fracción de segundo. Pero mientras existen, estos nuevos elementos sintéticos, como el seaborgio (Sg, elemento 106) y el hassio (Hs, elemento 108) poseen, como cualesquiera otros, propiedades químicas bien definidas. En experimentos asombrosos se han investigado algunas de estas propiedades en átomos de seaborgio y hassio durante los efímeros momentos previos a su desintegración.

Tales estudios no solo ponen a prueba los límites físicos de la tabla periódica, sino también sus aspectos conceptuales. ¿Siguen los elementos supermasivos exhibiendo las tendencias y regularidades de comportamiento químico que hicieron nacer la tabla periódica? La respuesta es que algunos sí, pero otros no. En particular, los átomos de gran masa retienen con tal fuerza a sus electrones más internos, que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Los efectos previstos por la teoría de la relatividad especial aumentan la masa de los electrones y pueden crear un caos en los estados energéticos cuánticos de los que dependen sus propiedades químicas y, por consiguiente, la periodicidad de la tabla.

Como se cree que los núcleos son estabilizados por ciertos «números mágicos» de protones y neutrones, algunos confían en hallar la denominada «isla de estabilidad», una región situada más allá de la capacidad actual de síntesis de elementos en la que los supermasivos vivirían más tiempo. ¿Existe, no obstante, alguna ley fundamental que limite su tamaño? Un cálculo sencillo lleva a pensar que la relatividad prohíbe que haya electrones ligados a núcleos de más de 137 protones. Pero cálculos más refinados ponen reparos a ese límite. «El sistema periódico no acabará en 137; de hecho, no acabará nunca», insiste Walter Greiner, físico nuclear de la Universidad Johann Wolfgang Goethe, de Frankfurt. La verificación experimental de tal aserto queda aún lejos.

6 ¿Se pueden fabricar computadoras de carbono?

Los microprocesadores fabricados con grafeno (una red de átomos de carbono) podrían resultar más potentes y rápidos que los basados en silicio. El descubrimiento del grafeno mereció el premio Nobel de física de 2010, pero el éxito de esta y otras formas de nanotecnología con carbono dependerá, en definitiva, de que los químicos puedan crear estructuras con precisión atómica.

El descubrimiento en 1985 de las buckybolas (moléculas huecas, similares a jaulas, formadas íntegramente por carbono) supuso el comienzo de algo mucho mayor. Seis años después entraron en escena los tubos de átomos de carbono, dispuestos en mallas hexagonales, como en las láminas de grafito; formaban estructuras tan regulares como la tela metálica de un gallinero. Estos nanotubos de carbono, por ser huecos, sumamente fuertes y rígidos, y conductores de la electricidad, prometían aplicaciones que iban desde materiales compuestos (o composites) muy robustos hasta diminutos hilos conductores y dispositivos electrónicos, cápsulas moleculares miniatura y membranas para filtrado de agua.

A pesar de las expectativas creadas, los nanotubos de carbono no han dado lugar a muchas aplicaciones comerciales. No se ha resuelto aún el problema de conectar los tubos para formar circuitos electrónicos complejos. En fecha más reciente, el

grafito ha tomado el protagonismo al descubrirse la posibilidad de escindirlo en láminas individuales, similares a una tela metálica hexagonal, el grafeno, que podría emplearse en la fabricación de circuitos electrónicos robustos, baratos y ultraminiaturizados. Se confía en que la industria informática pueda utilizar estrechas cintas y redes de grafeno, cortadas a la medida, con precisión atómica, para construir chips de mejor rendimiento que los basados en silicio.

Se puede configurar el grafeno para evitar los problemas de ubicación e interconexión de los nanotubos de carbono, afirma el especialista en carbono Walt de Heer, del Instituto de Tecnología de Georgia. No obstante, los métodos de huecograbado actuales son demasiado burdos para configurar los circuitos de grafeno con precisión atómica. La clave para lograr tal precisión, y abrir así el futuro de la electrónica de grafeno, pudiera hallarse en la aplicación de métodos de química orgánica que permitieran construir circuitos de grafeno desde la base, al concatenar moléculas «poliaromáticas» que contuvieran, cada una de ellas, varios anillos hexagonales de carbono.

7 ¿Cómo aprovechar mejor la energía solar?

Hoy tan solo utilizamos una fracción insignificante del inmenso recurso de energía limpia que representa la radiación solar. La dificultad principal de su aprovechamiento reside en el coste. El elevado precio de los paneles fotovoltaicos hechos con silicio todavía restringe su aplicación. Pero la vida en la Tierra, que en su práctica totalidad se sustenta sobre la energía solar y la fotosíntesis, demuestra que las fotocélulas no tienen que ser enormemente eficientes si, al igual que las hojas, pueden fabricarse en abundancia con materiales baratos.

Utilizar la radiación solar para producir combustibles constituye uno de los santos griales de la investigación sobre energía solar, afirma Devens Gust, de la Universidad estatal de Arizona. La forma más sencilla de conseguirlo consiste en descomponer el agua para obtener hidrógeno y oxígeno gaseosos. Nathan S. Lewis y sus colaboradores en el Instituto de Tecnología de California están desarrollando una hoja artificial con nanofilamentos de silicio para que realice ese proceso.

A principios de este año, el equipo de Daniel Nocera, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, dio a conocer una membrana de base silícea dotada de un fotocatalizador de cobalto que se encargaba de la descomposición del agua. Nocera estima que con unos cuatro litros de agua se obtendría combustible suficiente para el suministro eléctrico diario de un hogar de un país en desarrollo. «Nuestro objetivo es que cada vivienda se abastezca a sí misma de electricidad».

La descomposición del agua mediante catalizadores sigue planteando obstáculos. Según Gust, los catalizadores de cobalto, como el que utiliza Nocera, y otros recién descubiertos, formados por metales corrientes, resultan prometedores. Pero todavía no se ha hallado uno óptimo que presente un bajo coste. «Ignoramos cómo funciona el catalizador fotosintético natural, que se basa en cuatro átomos de manganeso y uno de calcio», añade Gust.

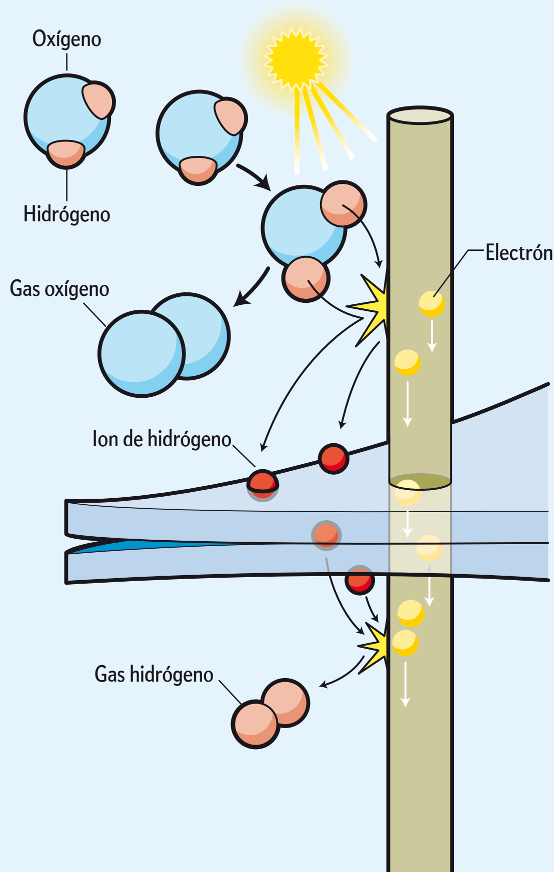
Su equipo ha examinando la posibilidad de crear ensamblajes moleculares para la fotosíntesis artificial que remeden el sistema biológico que los inspira. Ha logrado sintetizar algunas de las unidades que podrían integrarse en tales ensamblajes. Pero todavía falta mucho trabajo por hacer. Las moléculas orgánicas, igual que las utilizadas por la naturaleza, tienden a fragmentarse con rapidez. Y mientras que las plantas producen sin cesar nuevas proteínas para sustituir a las descompuestas, las hojas artificiales no cuentan —por ahora— con la maquinaria celular de síntesis química que lo permita.

8 ¿Cuál es la mejor forma de obtener biocombustibles?

En lugar de producir combustibles mediante la captura de los rayos de sol, ¿por qué no dejamos que las plantas almacenen para nosotros la energía solar y después convertimos la materia vegetal en combustibles? Los biocombustibles como el etanol, obtenido del maíz, y el biodiésel, derivado de semillas, ya se han hecho un nicho en los mercados energéticos. Pero estos cultivos amenazan con desplazar a los destinados a la producción de alimentos, especialmente en los países en desarrollo, donde la exportación de biocombustibles puede resultar más lucrativa que alimentar a la propia población. Los datos resultan abrumadores: para satisfacer la actual demanda de petróleo se deberían requisar enormes áreas de tierra cultivable.

Puede que la conversión de alimentos en combustibles no suponga por tanto la mejor solución. Una posibilidad consistiría en explotar otras formas de biomasa de las que no dependa la vida de las

Imitar a la plantas representa una de las estrategias para desarrollar nuevos materiales y catalizadores que capten energía solar y la almacenen en forma de hidrógeno gaseoso. En el esquema, nanofilamentos expuestos a la luz solar escinden las moléculas de agua en iones de hidrógeno, átomos de oxígeno y electrones. Los iones y los electrones descienden y pasan al otro lado de la membrana. Entonces, los nanohilos catalizan la formación de hidrógeno a partir de los electrones y los iones.



BROWN BIRD DESIGN

personas. Los EE.UU. producen suficientes residuos agrícolas y forestales para proveer casi una tercera parte del consumo anual de gasolinas y gasóleos para transporte.

Pero para convertir esa biomasa de baja calidad en combustible hay que descomponer antes la lignina y la celulosa, las principales moléculas estructurales de los vegetales. Aunque se conocen métodos para hacerlo, estos resultan costosos, ineficientes o no se pueden aplicar a gran escala.

La fragmentación de la lignina, mediante la ruptura de los enlaces carbono-oxígeno que concatenan los anillos «aromáticos» de carbono, como el del benceno, ha sido abordada con éxito por John Hartwig y Alexey Sergeev, ambos de la Universidad de Illinois, mediante el empleo de un catalizador de níquel. Hartwig señala que si la biomasa ha de suministrar materias primas no fósiles para usos industriales, además de combustibles, deberán extraerse también de ella compuestos aromáticos (los que presentan una estructura a base de anillos aromáticos). La lignina representaría la principal fuente de tales compuestos en la biomasa.

Para que resulte práctica, tal conversión debería partir de una biomasa en su mayor parte sólida de la que se pudieran obtener combustibles líquidos, fácilmente transportables por oleoductos. La licuefacción tendría que efectuarse in situ, allí donde se recolectaran los vegetales. Una de las dificultades de la conversión catalítica reside en la enorme cantidad de impurezas que contiene la materia prima, pues en la síntesis química clásica no suelen manipularse materiales tan rudos como la madera. Según Hartwig, aunque no exista unanimidad sobre la forma de abordar el problema, sin duda la respuesta se hallará con ayuda de la química, especialmente en el descubrimiento de catalizadores adecuados. Y añade que casi todas las reacciones industriales a gran escala entrañan un catalizador.

9 ¿Pueden idearse nuevas formas de crear fármacos?

La química posee un carácter esencialmente práctico y creativo. Gracias a ella se producen moléculas, una operación fundamental para crear cualquier cosa, desde materiales nuevos hasta antibióticos que venzan a bacterias resistentes.

En los años noventa del siglo xx, la química combinatoria alentó grandes esperanzas. Con ella se crean millares de moléculas nuevas por ensamblaje aleatorio de elementos constructivos, de las que se seleccionan las más eficaces. Antaño aclamada como el futuro de la química medicinal, la «combiquímica» cayó en desfavor por la escasa utilidad de lo que produjo.

La disciplina podría gozar de una segunda oportunidad si se lograra producir un repertorio extenso de moléculas y se hallara un modo de obtener diminutas cantidades de aquellas que resultaran eficaces. La biotecnología podría prestar ayuda en este aspecto. A cada molécula se le podría asignar un «código de barras», basado en ADN, que sirviera para identificarla y facilitar su extracción. O se podría refinar la colección de moléculas candidatas mediante una acción semejante a la evolución darwiniana en el laboratorio. Las moléculas proteicas con posible valor farmacológico se codificarían en ADN que se haría replicar para generar nuevas variantes a partir de las que tuvieran éxito, con lo que se obtendrían mejoras con cada ronda de replicación y selección.

Otras técnicas imitan la naturaleza para integrar fragmentos moleculares en disposiciones determinadas. Un ejemplo se hallaría en las proteínas, cuya secuencia precisa de aminoácidos se corresponde con el código de letras que albergan sus genes. Valiéndose de este modelo, los químicos podrían programar moléculas para que se ensamblasen por sí mismas. Esta estrategia reduciría los subproductos indeseados de la fabricación química tradicional y evitaría el desperdicio de energía y materiales.

El equipo de David Liu, de la Universidad de Harvard, está siguiendo esa metodología. Ha unido pequeñas moléculas (los elementos básicos del compuesto que se pretende sintetizar) a hebras cortas de ADN por medio de moléculas conectoras. Cada una de esas hebras puede hibridar (acoplarse) con una región distinta de otra molécula de ADN que actúa como molde y a la que acaban uniéndose las moléculas pequeñas tras separarse del conector. La hibridación secuencial de los fragmentos cortos de ADN con la hebra molde hace que las pequeñas moléculas se vayan incorporando a este, de una en una, hasta formar la molécula final, un proceso análogo a la síntesis de proteínas en la célula. El método de Liu podría resultar muy útil para la fabricación de nuevos fármacos a la carta. Muchos biólogos moleculares están convencidos de que las macromoléculas van a desempeñar un papel cada vez más importante, y tal vez el protagonista, en el futuro de la terapéutica.

10 ¿Podremos supervisar los parámetros bioquímicos de nuestro cuerpo?

Además de crear moléculas, existe un interés creciente en comunicarse con ellas, hacer que la química funcione como interfaz con cualquier cosa, como las células vivas, los ordenadores o las telecomunicaciones por fibra óptica.

La idea no es nueva. Desde los años sesenta del siglo xx se vienen utilizando biosensores, basados en reacciones químicas, para determinar el nivel sanguíneo de glucosa (si bien su uso en el control de la diabetes, en equipos económicos y portátiles, se ha generalizado hace poco). Los sensores podrían contar con un sinfín de aplicaciones, como la detección de concentraciones mínimas de contaminantes en el agua o en los alimentos, o indicios de gases o contaminantes en el aire. Un repertorio de sensores más rápidos, baratos y de mayor sensibilidad conllevaría avances en todas estas áreas.

Los resultados más impresionantes se obtendrían sin duda en el campo de la biomedicina. Ciertos productos de los carcinogenes circulan por el torrente sanguíneo mucho antes de que el mal pueda apreciarse en las pruebas clínicas habituales. La detección temprana de estos compuestos redundaría en prognosis más precisas y oportunas. La obtención rápida de un perfil genético permitiría afinar los tratamientos, que se ajustarían a cada paciente. Se reducirían así los efectos secundarios y se facilitaría la administración de medicamentos hoy retirados por los riesgos que entrañan para ciertas minorías genéticas.

Algunos prevén una supervisión continua y discreta de todo tipo de marcadores bioquímicos, índices de salud o enfermedad, que podrían facilitar información instantánea, ya sea a los cirujanos durante las intervenciones quirúrgicas o a sistemas automáticos de administración de medicamentos. Esta visión futurista depende del desarrollo de métodos químicos con sensibilidad selectiva respecto a ciertas sustancias, incluso cuando estas se presentaran en concentraciones nimias.

PARA SABER MÁS

Beyond the molecular frontier: Challenges for chemistry and chemical engineering. National Research Council. National Academies Press, 2003.

Let's get practical. George M. Whitesides y John Deutch en *Nature*, vol. 469, págs. 21-22, 6 de enero de 2011.


Deborah Blum es divulgadora científica. En 1992 ganó un premio Pulitzer. Supo de las feromonas al observar a su padre, entomólogo, extraerlas de las hormigas.

BIOQUÍMICA

EL OLOR DEL PENSAMIENTO

Aunque no nos percatemos de ello, nos comunicamos mediante señales químicas, tal y como hacen las abejas y las aves

Deborah Blum

UNA OSADÍA JUVENIL FUE LO QUE PUSO EN MARCHA LA CARRERA CIENTÍFICA DE Martha McClintock. En verano de 1968, como alumna del Colegio Wellesley, asistía a un curso del Laboratorio Jackson, en Maine. Durante un descanso para almorzar, investigadores de renombre discutían sobre la aparente sincronización de los ciclos ováricos en las hembras de ratón. La joven McClintock, que se hallaba cerca, les soltó de repente: «¿Saben? Las mujeres también lo hacen».

«No recuerdo las palabras exactas», explica ahora entre risas en el despacho de su laboratorio en la Universidad de Chicago. «Pero todos se volvieron y me miraron.» Resulta fácil imaginarla en aquel lejano encuentro, la misma mirada franca, la misma faz amistosa. Pero al grupo de la mesa no le hizo gracia y le espetaron que no sabía lo que decía.

McClintock, sin dejarse amedrentar, planteó la cuestión a varios doctorandos asistentes al curso, quienes le apostaron a que no podría hallar datos que respaldaran su afirmación. De regreso a Wellesley le consultó el asunto a Patricia Sampson, su supervisora de estudios. Y Sampson le contestó: «Acepta la apuesta, investígalo y averigua por ti misma si tienes razón o no».

Tres años después, McClintock publicó en *Nature* una nota de dos páginas, titulada «Menstrual synchrony and suppression» («Sincronía y supresión menstrual»). En su estudio detallaba un efecto fascinante observado en 135 mujeres de las residencias del Wellesley a lo largo de un curso académico. Los ciclos menstruales parecían variar, especialmente en mujeres que pasaban mucho tiempo juntas. La menstruación se hacía más sincrónica, con mayor superposición de las fechas de comienzo y término.

En la actualidad, la idea de sincronía en la menstruación humana suele conocerse como efecto McClintock. Pero la idea que ha continuado dando forma a sus investigaciones y a su reputación, e inspira un campo científico todavía floreciente, es que esa misteriosa sincronía, esa interconexión reproductora, está provocada por mensajes químicos entre las féminas. Es decir, los humanos, como tantas otras criaturas, nos comunicamos con nuestros semejantes mediante señales químicas.

La identificación de moléculas señalizadoras específicas y de sus efectos en nuestro organismo (como se ha hecho con precisión para un sinfín de feromonas de insectos) está resultando mucho más difícil de lo esperado. Pero en los cuatro decenios transcurridos desde el descubrimiento de McClintock, se ha podido ir esbozando un mapa de la influencia de las señales químicas sobre un espectro de conductas humanas. No solo sincronizamos nuestro ciclo reproductor, sino que podemos reconocer también a nuestros parientes, responder al estrés de otras personas y reaccionar ante su estado anímico. Conforme se vaya sabiendo más sobre esa red de interacciones humanas, más evidente será la arbitraria divisoria trazada entre los humanos y el mundo natural.

LA QUÍMICA EN EL REINO ANIMAL

La apasionante idea de que los animales compartan indicadores químicos invisibles cuenta con una larga e ilustre historia, al menos en lo que a otras especies concierne. Los antiguos griegos ya conjeturaban que las perras en celo podrían producir alguna misteriosa secreción que induciría en los machos un jadeante frenesí. Charles Darwin, al aludir a varias especies notorias por su olor, propuso que

EN SÍNTESIS

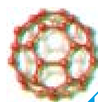
Existen indicios de que los humanos intercambian de modo inconsciente mensajes químicos que ayudan a sincronizar los ciclos menstruales femeninos, identificar la presencia de familiares o expresar estados anímicos, como el estrés o el miedo.

Estas señales químicas guardan semejanza con las feromonas halladas en cientos de especies animales, entre ellas, numerosos mamíferos.

Se están aislando compuestos segregados por humanos, de los que se pretende averiguar el efecto fisiológico y psicológico.

NOMA BAR





las señales químicas formaban parte del proceso de selección sexual. Hacia finales del siglo XIX, el naturalista Jean Henri Fabre se esforzaba en comprender el modo en que los reclamos químicos inducían a insectos alados a volar en una dirección concreta.

Aun así, la ciencia no arrancó en firme hasta 1959. Ese año, Adolf Butenandt, premio nóbel de química, aisló y analizó un compuesto liberado por las mariposas de la seda para atraer a los machos. Tras diseccionar los insectos, lo fue extrayendo con esmero de sus microscópicas glándulas secretoras. Logró reunir la cantidad suficiente para cristalizarlo y discernir su estructura molecular mediante rayos X. Lo llamó «Bombykol», por *Bombyx mori*, la mariposa de la seda.

Se trataba de la primera feromona conocida, aunque ese término aún no existía. Poco después, dos de los colaboradores de Butenandt, el bioquímico Peter Karlson y el entomólogo Martin Lüscher, acuñaron esta voz a partir de otras dos griegas, *pherein* («transportar») y *horman* («estimular»). Definieron las feromonas como unas diminutas moléculas portadoras de mensajes químicos entre individuos de la misma especie. Los compuestos han de ser activos en cantidades muy pequeñas y poderse captar por debajo de un umbral odorífero consciente. Liberados por un individuo y recibidos por otro, producen efectos mensurables, como una reacción, un comportamiento o un proceso de desarrollo.

Desde entonces se ha descubierto en insectos una asombrosa colección de feromonas: no solo en la mariposa de la seda, sino también en escarabajos del pino, mariposas de la col, termitas, áfidos, hormigas cortadoras de hojas y abejas melíferas. Constituyen la clase mejor descrita de moléculas de señalización química. Según un informe de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. de 2003, los entomólogos han desvelado hasta ahora los códigos de comunicación feromonal de más de 1600 insectos. Y las feromonas cumplen muchas más funciones que la simple atracción de compañeros para la reproducción: desencadenan alarma, identifican a los propios, alteran el estado de ánimo y ajustan las relaciones.

Hacia finales de los años ochenta, se había observado que las feromonas influían en un amplio espectro de especies que no eran insectos, entre ellas, langostas, peces, algas, levaduras, ciliados, bacterias y muchas otras. Conforme se fue desarrollando esta nueva ciencia de la comunicación química, que adquirió el nombre más formal de semioquímica, del griego *semion* («señal»), algunos científicos ampliaron su búsqueda a los mamíferos. Casi de inmediato chocaron con la oposición de sus colegas.

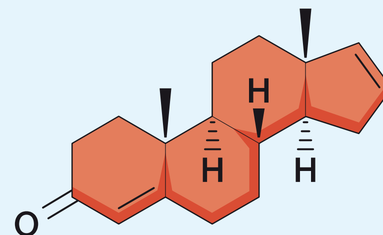
Milos Novotny, director del Instituto de Investigación en Feromonas de la Universidad de Indiana, evoca que en los años setenta y ochenta nadie deseaba oír hablar de feromonas en los mamíferos. Muchos le espetaban: «No existe nada de eso. Los mamíferos no son como los insectos. Son demasiado evolucionados y complejos para responder a las feromonas».

Pero hace unos 25 años, Novotny no solo había identificado una feromona en ratones que regulaba la agresión entre machos, sino que había logrado sintetizarla. Se comprobó la existencia de tales compuestos en ratas, hámsteres, conejos y ardillas. Conforme se iban añadiendo especies a lista, iba resultando más obvio que las feromonas de mamíferos eran muy semejantes, cuando no idénticas, a las descubiertas en insectos. La mayoría de los investigadores citan como ejemplo el asombroso trabajo de L. E. L. «Bets» Rasmussen, de la Universidad de Ciencia y Salud de Oregón, que en 1966 descubrió que una feromona sexual segregada por las hembras de elefante asiático era químicamente idéntica a la utilizada por más de 100 especies de polillas y mariposas nocturnas con fines reproductores. McClintock había propuesto una idea semejante en su pionero artículo de 1971, donde apuntó que tal vez alguna feromona femenina podría influir en la cronología del ciclo menstrual de otras mujeres.

PAISAJE OLFATIVO

McClintock, que ahora cuenta 63 años, tiene su laboratorio en el Instituto de la Mente y la Biología, en la Universidad de Chicago, del que es directora y fundadora. Reflexiona sobre el camino recorrido por la semioquímica desde hace cuarenta años. «Se ha descrito la existencia de comunicación química entre humanos. El próximo paso consiste en identificar las moléculas que intervienen en ella. Podremos entonces refinar nuestra comprensión y conocimiento de las funciones fundamentales que desempeñan.»

Tarea harto difícil. Se estima que el olor corporal humano emana de unos 120 compuestos. La mayoría de ellos se presentan en disoluciones acuosas muy débiles producidas por las glándulas sudoríparas o son liberados por las glándulas apocrinas, que segregan sustancias oleosas en los folículos pilosos. Las glándulas apocrinas se concentran sobre todo en las axilas, alrededor de los pezones y en el área genital.



La androstadienona, un esteroide, podría recibir la designación de feromona humana. Se ha demostrado que influye en la cognición, las hormonas de estrés y las respuestas emotivas.

Se trata de un paisaje complejo, que se complica aún más por el uso que hacemos de sustancias exógenas (jabones, desodorantes, perfumes), señala Johan Lundström, del Centro Monell de Sentidos Químicos, de Filadelfia. No obstante, Lundström se maravilla ante la destreza de nuestros cerebros para dilucidar semejante laberinto químico. En trabajos de neuroimagen realizados en su laboratorio se han apreciado respuestas un 20 por ciento más rápidas a las señales químicas humanas ya conocidas que a otras moléculas, químicamente similares, presentes en otros puntos del entorno. El cerebro siempre distingue el olor corporal, afirma.

Esa facultad se presenta ya en el primer año de vida. En numerosos estudios con humanos se ha comprobado que, al igual que en los animales, madre e hijo se hallan finamente sintonizados al aroma del otro. Este conocimiento olfativo es de tal precisión que los bebés prefieren incluso aquellas partes de vestidos usados por su madre —y solo por su madre— que hayan estado en contacto con compuestos del sudor. Cabe señalar que el efecto resulta más acusado en bebés criados a pecho que con leche maternizada.

Según Lundström, todavía se está elucidando qué compuestos ejercen un efecto y cuáles no. Sin duda, no se trata de un compuesto único, sino más bien de un repertorio de ellos, cuya importancia podría variar de un momento a otro. Las feromonas operan por debajo del umbral de detección olfativo e influyen en numerosas conductas, aunque no necesariamente las controlan del todo. Si las comparamos con las señales sociales, quizá resulten menos importantes que otras formas de comunicación más obvias. Pero esa capacidad tal vez haya contribuido a nuestra super-

BROWN BIRD DESIGN

vivencia en el proceso evolutivo, al mantenernos más íntimamente en sintonía unos con otros.

La psicóloga Denise Chen, de la Universidad de Rice, sostiene también que las alertas químicas nos habrían conferido ventajas evolutivas. La investigadora obtiene muestras de olor corporal de espectadores de películas de terror valiéndose de piezas de gasa colocadas en sus axilas, que recogen la sudoración de los sujetos al sentir miedo. A continuación hace oler las gasas a voluntarios. Para comparación, Chen muestrea también el sudor de espectadores de comedias o de películas emotivamente neutras, como los documentales.

En uno de sus primeros experimentos observó que los participantes discernían si el donante del sudor se sentía atemorizado o feliz. Acertaron en sus conjeturas más que si las hubieran hecho al puro azar, sobre todo en el caso del sudor inducido por miedo. Al proseguir con sus investigaciones, Chen demostró que la exposición al «sudor del miedo» parecía intensificar la respuesta de alarma, ya que los participantes reconocían mejor el miedo en los rostros de otros. La exposición reforzaba incluso la eficacia cognitiva: en tests de asociación verbal que contenían términos relacionados con algún peligro, las mujeres que olieron sudor de miedo superaron a quienes les fue presentada una sudoración neutra. «Si hueles el miedo, detectas antes las palabras asociadas a él», explica Chen.

En un estudio reciente, Chen y Wen Zhou, de la Academia de Ciencias de China, compararon la respuesta de parejas de larga duración con otras de corta duración. Los resultados indicaron, como tal vez cabía esperar, que cuanto más tiempo llevaba junta una pareja, más acertaba a interpretar la información de temor o de felicidad del otro, al parecer codificada en el sudor. Chen espera, en última instancia, que entender la importancia del olfato sirva para comprendernos a nosotros mismos.

Y se están obteniendo más pruebas sobre la influencia de la percepción inconsciente de olores en un abanico de conductas humanas, desde la cognitiva a la sexual. En enero de este año, un equipo del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, dirigido por el psicólogo Noam Sobel, informó de que los hombres que habían olfateado las lágrimas femeninas provocadas por una emoción sintieron de pronto menos interés sexual que otros que olieron una mera disolución salina. Sobel observó una respuesta física directa a esa aparente señal química: una reducción pequeña, pero mensurable, en la concentración sanguínea de testosterona en los probandos. Es posible que la señal haya evolucionado para significar menor fertilidad, como ocurre durante la menstruación. De modo más general, el descubrimiento puede contribuir a explicar un rasgo exclusivo de los humanos, el llanto.

DESCRIBIR EL MECANISMO EXACTO

Uno de los principales objetivos consiste ahora en identificar los compuestos clave que aportan señales subrepticias y determinar el modo en que nuestro organismo detecta esas señales y reacciona ante ellas. George Preti, químico en Monell, ha trazado un plan de investigación en el que se prevé estudiar esos mensajeros mediante el análisis del sudor y las secreciones apocrinas, así como examinar las concentraciones hormonales en los sujetos que olfatean esos compuestos. Plan con el que concuerda Lundström, quien afirma que aún hay que determinar con precisión las señales portadoras de la información.

También McClintock lo considera prioritario. De hecho, se ha centrado hace poco en la descripción detallada de una de las quimioseñales más potentes, el esteroide androstadienona. McClintock considera que la fuerte acción de esta pequeña molécula hace que merezca la denominación de feromona humana. Actúa como una señal química que indica pertenencia a la especie e influye en la psicología y en la conducta. Desde hace años, varios laboratorios, entre ellos los de McClintock y Lundström, han hallado que el compuesto ejerce efectos mensurables sobre la cognición, modifica las concentraciones de hormonas de estrés, como el cortisol, e induce cambios en la conducta emotiva.

En tiempo reciente, McClintock y Suma Jacob, de la Universidad de Illinois en Chicago, han estudiado la influencia de la androstadienona en el estado de ánimo. Mezclaron una mínima cantidad en el disolvente propilenglicol y enmascararon su posible aroma con aceite de clavo. A continuación expusieron un grupo de estudio a una disolución que contenía el compuesto, y un grupo de control al disolvente puro. Se les pidió a los probandos que olisquearan gasas con una de las dos variantes; se les dijo que participaban en una investigación sobre el olfato. Por último, todos los probandos debían cumplimentar un largo y tedioso cuestionario.

En conjunto, los sujetos expuestos a la androstadienona estuvieron de mejor humor durante la prueba, que duró entre 15 y 20 minutos. En un estudio de seguimiento se repitió el proceso, completado ahora con técnicas de neuroimagen. Se observó que ciertas regiones cerebrales asociadas con la atención, la emoción y el procesamiento visual se hallaban más activas en los individuos expuestos a la sustancia señalizadora. McClinctock considera que se trata de un fenómeno feromonal clásico, del tipo de los que ella conjeturaba hace decenios.

Incluso así, ella y otros investigadores siguen hablando de las «supuestas feromonas». Los humanos somos complicados. Resulta difícil demostrar de forma concluyente la existencia de vínculos causales entre compuestos específicos y cambios conductuales. De hecho, nadie sabe con certeza qué sustancia o sustancias explican el hallazgo inicial de McClintock, la sincronización de los ciclos menstruales. Incluso el fenómeno se muestra un tanto elusivo: se ha confirmado en numerosos estudios, pero también refutado en otros, por lo que aún no ha sido aceptado de forma unánime.

Gran parte del debate se centra en saber con exactitud lo que se sincroniza, si se trata del momento de la ovulación o de la duración del ciclo. Una revisión de datos obtenidos desde los años noventa por Leonard y Aron Weller, padre e hijo, de la Universidad Bar-Ilan en Israel, ha revelado que la sincronización se produce unas veces, y otras no. «Si existe», informaba Leonard Weller, «está claro que no es ubicua».

Aunque conserva la autoconfianza de sus días de estudiante, McClintock concede que el efecto es más sutil de lo que al principio había creído. Pero también opina que los críticos tienden a dejar de lado el punto más importante: que desde aquel estudio suyo se han ido aportando cada vez más pruebas sobre la comunicación química entre humanos. Y no sorprende que nuestro sistema de mensajería química esté resultando tan intrincado como cualquier otra forma de comunicación humana.

PARA SABER MÁS

Menstrual synchrony and suppression. Martha McClintock en *Nature*, vol. 229, págs. 244-245, 22 de enero de 1971.

Pheromones and animal behavior: Communication by smell and taste. Tristram D. Wyatt. Cambridge University Press, 2003.

Insect pheromones: Mastering communication to control pests. Margie Patlak et al. National Academy of Sciences, 2009.

Fifty years of pheromones. Tristram D. Wyatt en *Nature*, vol. 457, págs. 262-263, 15 de enero de 2009.

José M. Eirín López y **Josefina Méndez** son profesores de genética en la Universidad de La Coruña y directores del grupo XENOMAR-CHROMEVOL. Investigan junto con **Rodrigo González Romero** la evolución de la fibra de cromatina. Durante los últimos diez años, y en colaboración con **Juan Ausió**, profesor de bioquímica en la Universidad de Victoria (Canadá), han descifrado los mecanismos moleculares que rigen la evolución de los genes de las histonas. El pasado mes de noviembre, José M. Eirín fue galardonado por la Sociedad Española de Biología Evolutiva con el premio al Mejor Investigador Joven en Biología Evolutiva 2011.



GENÉTICA

El papel clave de las histonas

La evolución de esta familia de proteínas ha permitido organizar el material hereditario y regular su metabolismo de una forma cada vez más precisa y coordinada

Rodrigo González Romero, Juan Ausió, Josefina Méndez y José M. Eirín López

Aunque la diversidad biológica existente en la naturaleza es inmensa y aún no entendemos bien muchos de sus aspectos, todas las formas de vida comparten una característica: su información genética hereditaria se encuentra codificada en moléculas de ácidos nucleicos (ADN en la mayoría de los casos, con la única excepción de ciertos virus, cuyo material hereditario se compone de ARN). A lo largo de la evolución, el aumento en la complejidad de los seres vivos ha quedado supeditado a la capacidad de almacenar una cantidad de información genética cada vez mayor. Considere, por ejemplo, las células de su cuerpo. Cada una de ellas posee una molécula de ADN de unos dos metros de longitud, la cual debe acomodarse en el interior de un núcleo cuyo diámetro es 300.000 veces menor. Este dato refleja con claridad uno de los problemas evolutivos de mayor importancia: cómo empaquetar la máxima cantidad posible de ADN en el interior del núcleo celular.

Con la aparición de la célula eucariota, hace más de 2000 millones de años, llegó la solución: incorporar elementos estructurales proteicos sobre los que la doble hélice de ADN pudiera enrollarse de forma ordenada, progresiva y eficiente. Sin dichas proteínas estructurales, las histonas, el ADN sería poco más que una maraña desorganizada de compuestos químicos.

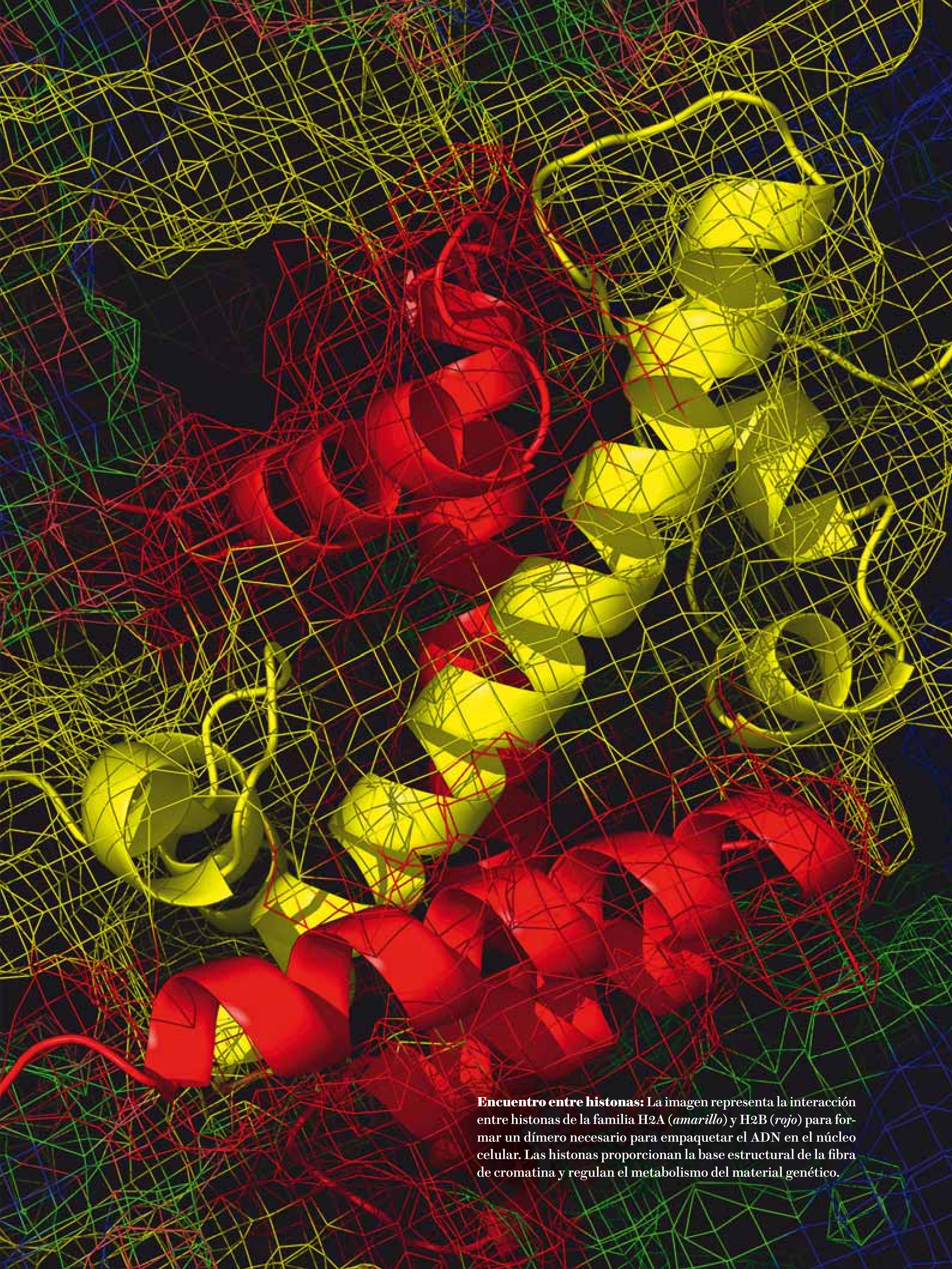
EN SÍNTESIS

Sin las histonas, el ADN sería una maraña desorganizada de nucleótidos. Estas proteínas permiten el empaquetamiento eficiente del material hereditario en el núcleo celular.

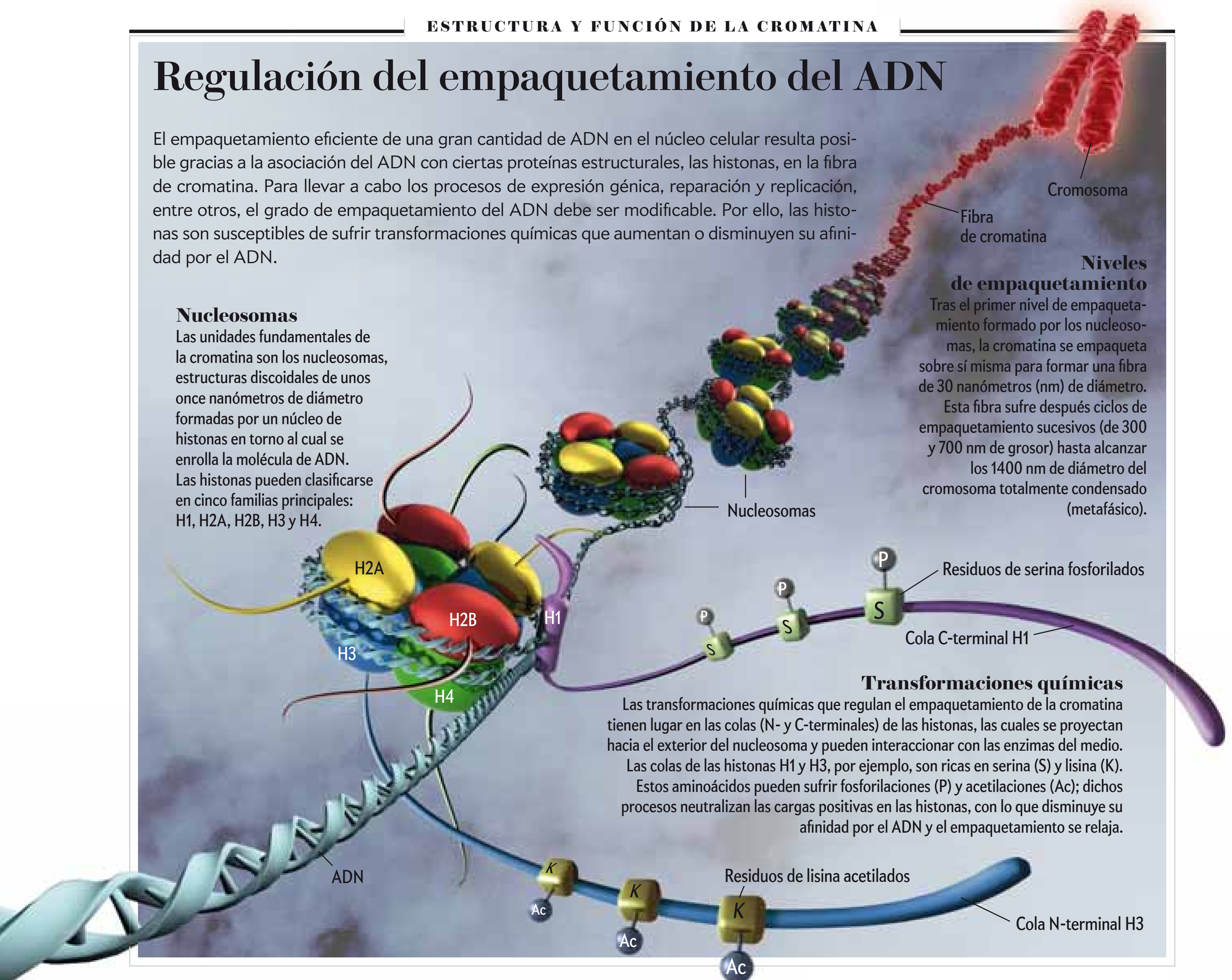
Sin embargo, su papel excede con mucho el de mero soporte estructural para el ADN: las histonas regulan también el metabolismo del material hereditario.

Investigaciones recientes han revelado sus mecanismos de evolución. Su principal característica reside en constituir una base estructural y funcional susceptible de continuas mejoras.

La gran diversificación y especialización de las histonas ha permitido que las diferentes formas de vida alcancen la complejidad celular que observamos hoy en la naturaleza.



Encuentro entre histonas: La imagen representa la interacción entre histonas de la familia H2A (*amarillo*) y H2B (*rojo*) para formar un dímero necesario para empaquetar el ADN en el núcleo celular. Las histonas proporcionan la base estructural de la fibra de cromatina y regulan el metabolismo del material genético.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN R. GONZÁLEZ ROMERO, J. AUSIÓ, J. MÉNDEZ Y J. M. EIRÍN LÓPEZ

Sin embargo, las histonas ocultaron hasta el último decenio del siglo pasado un papel, si cabe, aún más importante. Estas proteínas representan la llave de acceso a toda la información contenida en el material genético; es decir, desempeñan una función clave como reguladoras del metabolismo del ADN. En respuesta a las necesidades de la célula, las histonas controlan el grado de empaquetamiento del ADN durante los procesos de expresión génica, replicación o reparación del material hereditario, entre otros muchos. Desde un punto de vista evolutivo, la constante diversificación y especialización de esta familia de proteínas resulta fundamental para explicar el origen de la diversidad celular y biológica existente hoy en día en la naturaleza.

LA ARQUITECTURA FUNCIONAL DEL ADN

Las histonas fueron identificadas por Albrecht Kossel en 1884 en glóbulos rojos de oca (a diferencia de los mamíferos, los hematíes de las aves y de numerosos reptiles sí poseen núcleo). Más tarde, se demostró su presencia en el núcleo de todas las células eucariotas. Se trata de proteínas simples, de pequeño tamaño y dotadas de carga eléctrica positiva, lo que facilita su interacción con el ADN, de carga negativa.

Esa asociación de ADN e histonas da lugar a un complejo nucleoproteico denominado fibra de cromatina. Dicha fibra presenta varios niveles de organización sucesivos [*véase* «Evolución de la cromatina», por G. A. Babbitt; Investigación y Ciencia, mayo de 2011], el mayor de los cuales se corresponde con el cromosoma totalmente condensado (metafásico), de unos 1400 nanómetros de diámetro. Al analizar el cromosoma con más y más detalle, aparecen estructuras de empaquetamiento cada vez menores. Las unidades fundamentales de la fibra de cromatina son los nucleosomas, pequeñas «perlas» compuestas de histonas y ADN, de geometría discoidal y con unos 11 nanómetros de diámetro.

Según las características estructurales y funcionales que las histonas desempeñan en el nucleosoma, podemos distinguir entre las histonas del cuerpo central (*core*) y las de enlace (*linker*). A las primeras pertenecen las familias H2A, H2B, H3 y H4. Estas se agrupan en octámeros formados por dos copias de cada familia. Cada una de estas asociaciones de ocho histonas con-

forma el cuerpo central de un nucleosoma, en torno al cual la molécula de ADN se enrolla dos veces, lo que comprende entre 146 y 200 pares de bases. Las histonas de enlace, pertenecientes a la familia H1, se encargan de sellar los dos giros del ADN alrededor de la estructura central. Ello permite una compactación adicional de la cromatina y facilita su organización en estructuras de orden superior.

Los genes que codifican las histonas se encuentran presentes en el genoma de todos los organismos eucariotas: animales, plantas y hongos. Durante los últimos cuarenta años, numerosos estudios han puesto de manifiesto que dichos genes comparten una serie de características. Entre ellas destacan la ausencia de intrones (segmentos de ADN intermedios no codificantes), una expresión coordinada con la división celular, así como la presencia de múltiples copias relativamente homogéneas (repetidas entre decenas y cientos de veces) agrupadas en determinadas regiones del genoma. Esta organización favorece una expresión muy rápida de las histonas, cualidad necesaria durante los procesos de división celular debido a la gran demanda de estas proteínas cuando el material hereditario se duplica.

En un principio, las histonas fueron consideradas un mero soporte para la organización del ADN, carente de toda función relevante. Durante la segunda mitad del siglo XX, esta visión simplista coincidió con el desarrollo de la biología molecular y el estudio funcional del ADN, lo que acentuó la pérdida progresiva del interés por el estudio de las histonas y la cromatina. Por otro lado, la aparente ausencia de diversidad génica entre los miembros de esta familia reforzó la idea de su función meramente estructural.

Todo cambió cuando, en la década de los noventa, David Allis, de la Universidad Rockefeller de Nueva York, demostró que las histonas regulaban el empaquetamiento y desempaquetamiento de diferentes regiones del genoma en respuesta a señales celulares específicas. Ello implicaba que estas proteínas «simples» controlaban la expresión o represión selectiva de los genes mediante la reorganización de la cromatina. En otras palabras, las histonas proporcionan el soporte físico en el que tiene lugar la mayoría de los procesos metabólicos inherentes al material hereditario, por lo que constituyen también la última barrera física que separa el ADN de los complejos con los que este debe interaccionar para desempeñar todas sus funciones.

UNA DIVERSIDAD SORPRENDENTE

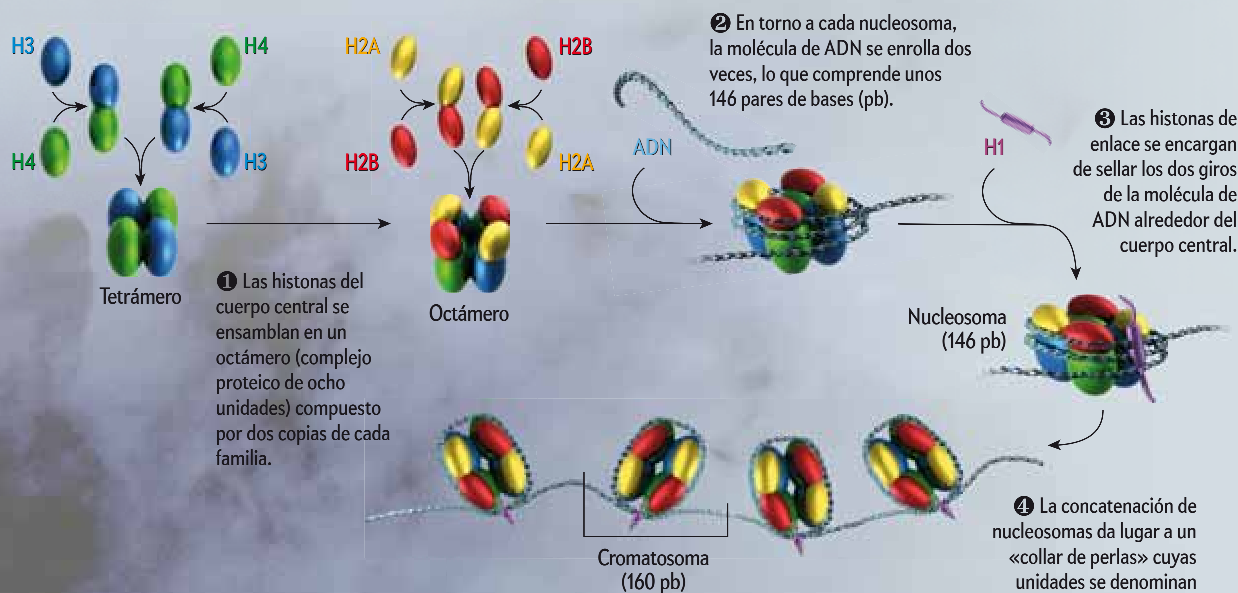
El descubrimiento del papel regulador de las histonas en el metabolismo del ADN abrió la puerta al estudio integrado de la estructura y función del material hereditario. Sin embargo, la aparente homogeneidad de los genes asociados a estas proteínas continuaba siendo irreconciliable con su gran diversidad funcional.

La solución a dicha paradoja habría de esperar hasta el desarrollo de las técnicas de secuenciación masiva del ADN. El resultado puso de manifiesto lo que muchos investigadores intuían: la familia de las histonas abarcaba, en realidad, una diversidad génica extraordinaria. Se descubrió así la existencia de una gran variedad de histonas, desde algunas casi idénticas entre sí has-

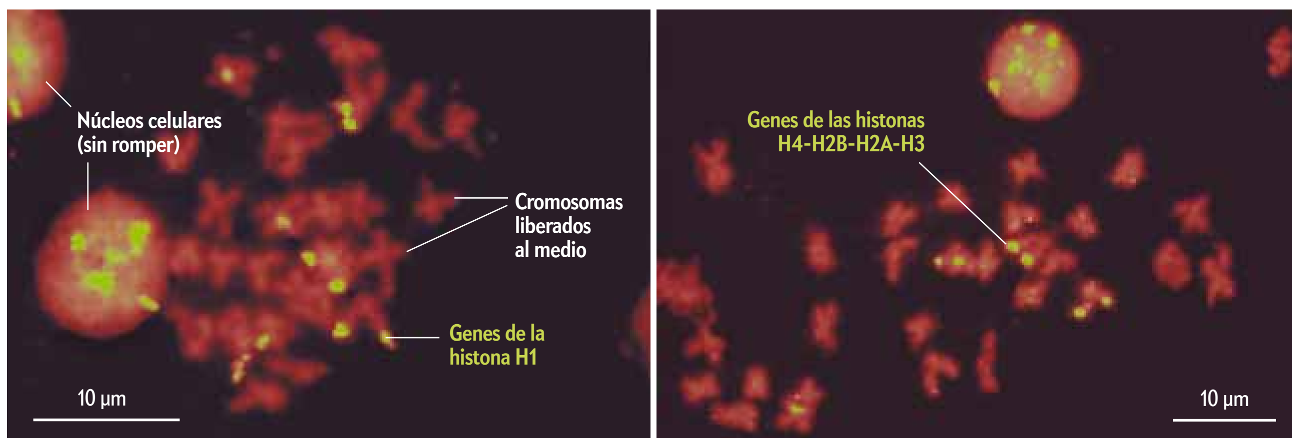
FAMILIAS DE HISTONAS

Un collar de perlas

Las histonas sustentan el empaquetamiento del ADN en la fibra de cromatina. Las unidades fundamentales de esta compleja estructura son los nucleosomas, resultantes del ensamblaje de histonas y ADN, los cuales se concatenan en una suerte de «collar de perlas». En función de su disposición en el nucleosoma, las histonas se clasifican en cinco familias principales: las que forman el cuerpo central (H2A, H2B, H3 y H4) y las que se encargan de sellar los dos giros de ADN en torno a este (H1). El esquema muestra el ensamblaje de un nucleosoma.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN R. GONZÁLEZ ROMERO, J. AUSIÓ, J. MÉNDEZ Y J. M. EIRÍN LÓPEZ



Las histonas en el genoma: Los genes que codifican las histonas se encuentran presentes en múltiples regiones del genoma. Gracias al empleo de sondas moleculares específicas para el mejillón *Mytilus galloprovincialis*, la detección de dichos genes (*fluorescencias*) mediante la técnica de hibridación in situ fluorescente (FISH) pone de manifiesto las repeticiones de los genes de la histona H1 (*izquierda*) y los de las histonas del cuerpo central del nucleosoma (*derecha*). Estas últimas se organizan en unidades de repetición. En el caso de *Mytilus galloprovincialis*, la organización de dicha unidad es H4-H2B-H2A-H3.

ta otras muy divergentes, pasando por un amplio abanico de formas intermedias. Fue precisamente el grupo de histonas divergentes, o histonas variantes, el que más llamó la atención de los investigadores debido a sus grandes diferencias con las histonas típicas o «canónicas».

De todas ellas, la familia de la histona de enlace H1 reúne el mayor elenco de variantes, con funciones específicas en diferentes tejidos y etapas del desarrollo. Aunque en menor medida, también las histonas del cuerpo central del nucleosoma exhiben variantes, entre las que se encuentran las que quizá sean las más estudiadas hasta la fecha, las histonas H2A.X y H2A.Z, involucradas en la reparación del ADN y en la regulación de la expresión génica, respectivamente. También se han identificado variantes en la familia H3, como H3.3 (que interviene en la reorganización de la cromatina espermática de los mamíferos) y CENPA (responsable de la organización de la cromatina en los centrómeros de los cromosomas), así como diferentes variantes exclusivas de la línea germinal masculina en el caso de H2B (TH2B, H2BFW y subH2Bv).

Las histonas variantes desempeñan un papel fundamental en los procesos de condensación y descondensación de la cromatina. Dichas transformaciones dinámicas se deben a la combinación de tres mecanismos: el reemplazamiento de histonas canónicas por histonas variantes (especializadas), modificaciones químicas en la estructura de las histonas (modificaciones postraduccionales) y la asociación con complejos capaces de remodelar la estructura de la cromatina. La combinación adecuada de estos tres mecanismos activa y regula procesos concretos en el material hereditario. Por ejemplo, la sustitución de la histona H2A por la variante H2A.X, seguida de un proceso de fosforilación de la proteína, propicia la reparación del ADN. La correcta coordinación de estos mecanismos para lograr un resultado u otro se conoce como *código de histonas*. Sin embargo, se ignora si dicho código queda determinado por las propias histonas o si, por el contrario, existe algún mecanismo superior que «ordena» tales modificaciones. Hoy en día, descifrar este código representa la última frontera del conocimiento acerca del metabolismo del material hereditario en el núcleo celular.

EVOLUCIÓN CONCERTADA

Dada la gran diversidad de esta familia de proteínas, cabe preguntarse por su origen y por los mecanismos evolutivos que han posibilitado la aparición de todas sus variantes. La organización del material hereditario en la fibra de cromatina resulta exclusiva de los organismos eucariotas. El origen de las histonas, sin embargo, parece remontarse a las arqueobacterias, un grupo de microorganismos unicelulares que empaquetan su material hereditario mediante pseudohistonas, una clase de proteínas similares a las histonas. Durante las dos últimas décadas, Kathleen Sandman y John N. Reeve, de la Universidad estatal de Ohio, han caracterizado las pseudohistonas y su relación con la organización del material hereditario en esta clase de microorganismos. A pesar de ser más simples que las histonas eucariotas, también las pseudohistonas forman estructuras alrededor de las cuales se enrollan unos 60 pares de bases de ADN.

El origen arqueobacteriano de las histonas eucariotas fue sugerido en 1998 por Sandman y Reeve al hilo de una hipótesis novedosa para explicar el origen del primer eucariota, publicada ese mismo año en la revista *Nature* por William Martin, por entonces en la Universidad Técnica de Braunschweig, y Miklós Müller, de la Universidad Rockefeller. Dicha hipótesis postulaba que el núcleo de la célula eucariota se originó a partir de una arqueobacteria ancestral. De ella habría adquirido una organización del material hereditario basada en la asociación de proteínas y ADN.

Las histonas y el mecanismo de empaquetamiento del ADN se habrían originado, por tanto, hace más de 2000 millones de años en el ancestro común de arqueobacterias y eucariotas. Ello facilitó el incremento del tamaño del genoma y el desarrollo de la complejidad característica de las células eucariotas. A lo largo de la evolución, la diferenciación entre las cinco familias de histonas representó un hito en el empaquetamiento eficiente del material genético.

En un principio, ese proceso evolutivo se atribuyó a un mecanismo molecular conocido como evolución concertada. Este consiste en la recombinación de material genético entre diferentes copias de un único tipo de genes en diversas regiones del genoma, lo que conduce a una homogeneización extensiva de

dichos genes como un único bloque de información e impide la alteración de sus secuencias de ADN.

La relevancia de ese mecanismo se debe a que, por lo general, todas las copias de genes de una familia deben hallarse operativas, por lo que han de evitarse mutaciones perniciosas. Cuando un gen sufre una mutación y se inactiva, el mecanismo de evolución concertada toma como molde alguna de las copias no mutadas (funcionales) para reparar el gen alterado. Podemos comparar el proceso con el funcionamiento de una cooperativa: cuando uno de sus miembros se ve en problemas, los demás lo ayudan a recuperarse para que toda la familia de genes continúe funcionando. Durante más de 30 años, la comunidad científica dio por sentado que la evolución concertada daba cuenta de la evolución de casi todas las familias de genes. De hecho, la familia génica de las histonas constituyó durante decenios uno de los ejemplos más utilizados para ilustrar este mecanismo.

Sin embargo, la gran cantidad de variantes de histonas descubiertas a finales del siglo xx se antojaba demasiado elevada como para que su evolución pudiera explicarse mediante un mecanismo que promovía tal grado de homogeneidad génica. Para entender por qué, imaginemos que un gen sufre una mutación que, si bien lo inhabilita para desempeñar la misma función que el resto de sus compañeros, le permite llevar a cabo una nueva tarea, casi idéntica, pero que complementa y mejora el funcionamiento del bloque. El problema con el mecanismo de evolución concertada reside en que este es ciego a la hora de evaluar si esa nueva función supone una mejora o no: el gen «díscolo» se repara y todo vuelve al estado original. Como resultado, toda la familia debe evolucionar como un bloque.

¿Puede ese mecanismo de evolución por bloques derivar en la gran variedad de histonas que han aparecido en el curso de la evolución? Un protozoo posee solo un tipo de histona H1. Pero, si nos adelantamos unos millones de años y consideramos un mejillón, veremos que este presenta dos tipos de histonas H1. Un reptil cuenta con tres variantes, y un mamífero, con más de diez. Fue esta diferenciación en histonas variantes, especializadas en funciones concretas, lo que desempeñó un papel clave en la regulación del metabolismo del ADN. Sin embargo, los mecanismos de evolución conocidos a finales del siglo pasado no permitían explicar el origen de dicha diversidad.

NACER Y MORIR

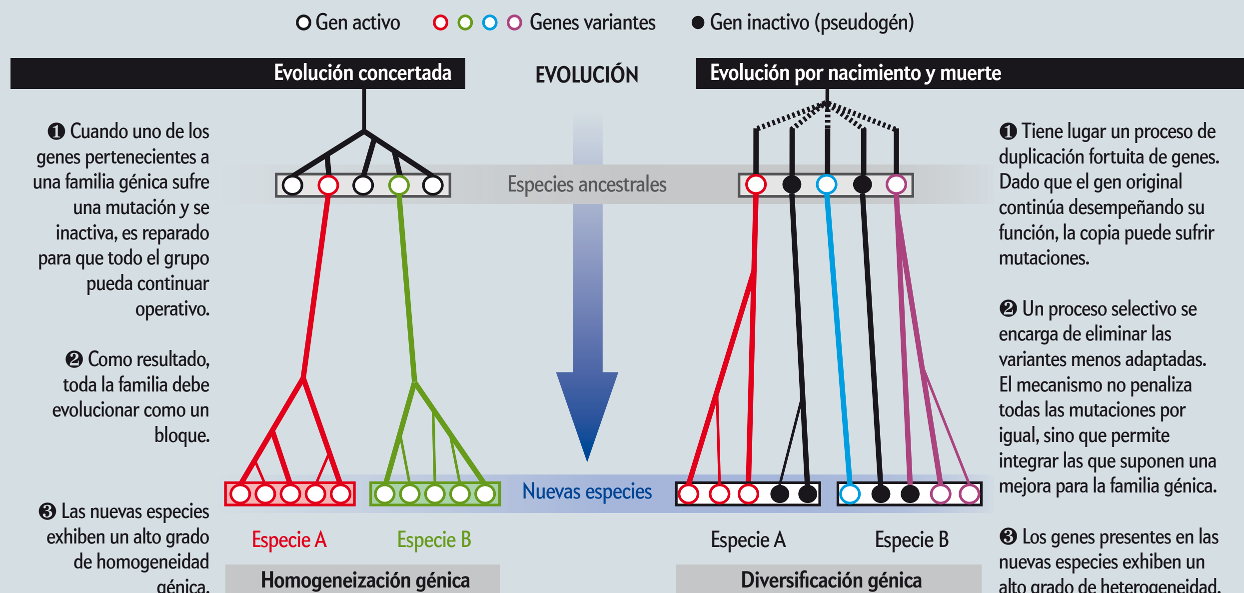
Con el objetivo de buscar una solución a dicha pregunta, nuestro grupo de investigación se propuso analizar el mecanismo de evolución molecular de las histonas en organismos eucariotas. Nuestros resultados, publicados entre los años 2004 y 2011, pusieron de manifiesto que la evolución de las histonas obedecía a un patrón molecular distinto. En primer lugar, acontece una duplicación de genes (generación fortuita de una copia de un

MECANISMOS DE EVOLUCIÓN MOLECULAR

Nacer y morir

Hasta hace unos años, se creía que la evolución de casi todas las familias de genes podía explicarse mediante el mecanismo de *evolución concertada*, según el cual todos los genes de una misma familia génica evolucionan de manera homogénea, como un bloque. Sin embargo, dicho mecanismo resultaba difícil de reconciliar con la gran variedad de histonas descubiertas a finales del siglo xx.

A lo largo de los últimos años, nuestro grupo de investigación, en colaboración con Ciro Rivera Casas, también en la Universidad de La Coruña, ha demostrado que la gran diversidad de esta familia de proteínas se debe a que estas siguieron un mecanismo evolutivo mucho más versátil, denominado *evolución por nacimiento y muerte*. Ello aumentó el grado de especialización de la fibra de cromatina, lo que permitió a la célula atender el abanico de necesidades vinculadas al empaquetamiento del ADN en diferentes tejidos y estadios de desarrollo.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN R. GONZÁLEZ ROMERO, J. AUSIÓ, J. MÉNDEZ Y J. M. EIRÍN LÓPEZ

segmento de ADN que contiene un gen). Después, dado que el gen original continúa desempeñando su función, la copia es libre de sufrir mutaciones con mayor rapidez y puede desarrollar funciones complementarias. Por último, un proceso selectivo se encarga de eliminar las variantes menos adaptadas («deletéreas»). Este mecanismo de evolución molecular se conoce como evolución mediante nacimiento y muerte, y fue propuesto en 1992 por Mastoshi Nei, de la Universidad estatal de Pensilvania, y Austin L. Hughes, de la Universidad de Indiana.

Si retomamos el ejemplo de la cooperativa, el mecanismo de nacimiento y muerte equivaldría a la instauración de un comité evaluador. Cuando aparece una mutación, el comité examina durante un tiempo la nueva función del gen mutado. Si esta resulta beneficiosa para el grupo, se incorpora a la cooperativa; en caso contrario, el gen se inactiva o se devuelve a su estado original. En términos biológicos, el papel del comité evaluador lo desempeña la selección natural. Este proceso conduce a un incremento del número de genes en el genoma, así como a la diversificación y especialización de sus funciones. En la actualidad, el mecanismo de nacimiento y muerte se ha convertido en el modelo principal para dar cuenta de la evolución de la mayoría de las familias génicas presentes en eucariotas.

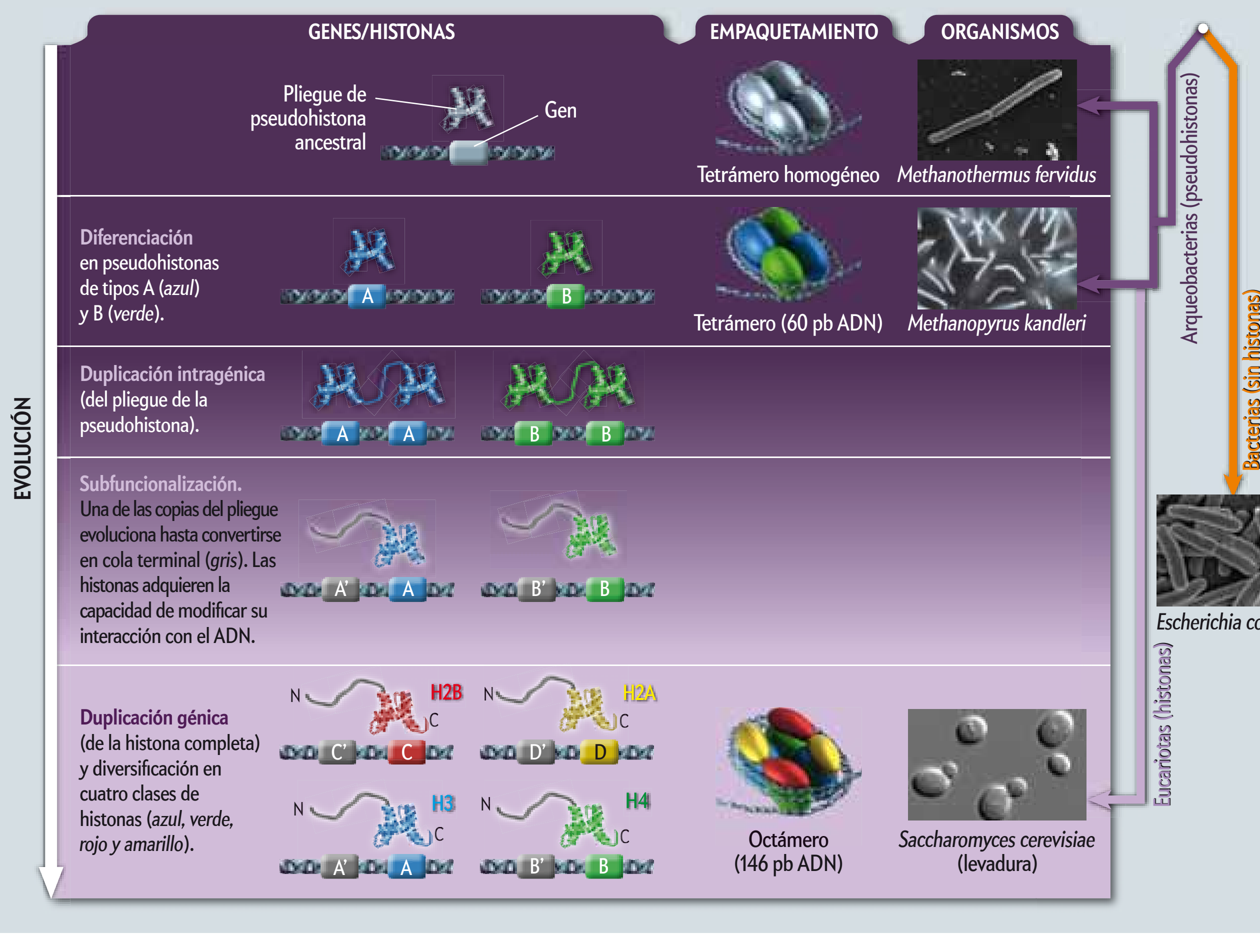
Es interesante reseñar que, a pesar de que dicho mecanismo ha determinado la evolución de las cinco familias de histonas, las tasas de nacimiento y muerte de los genes asociados no son

EVOLUCIÓN DE LAS HISTONAS

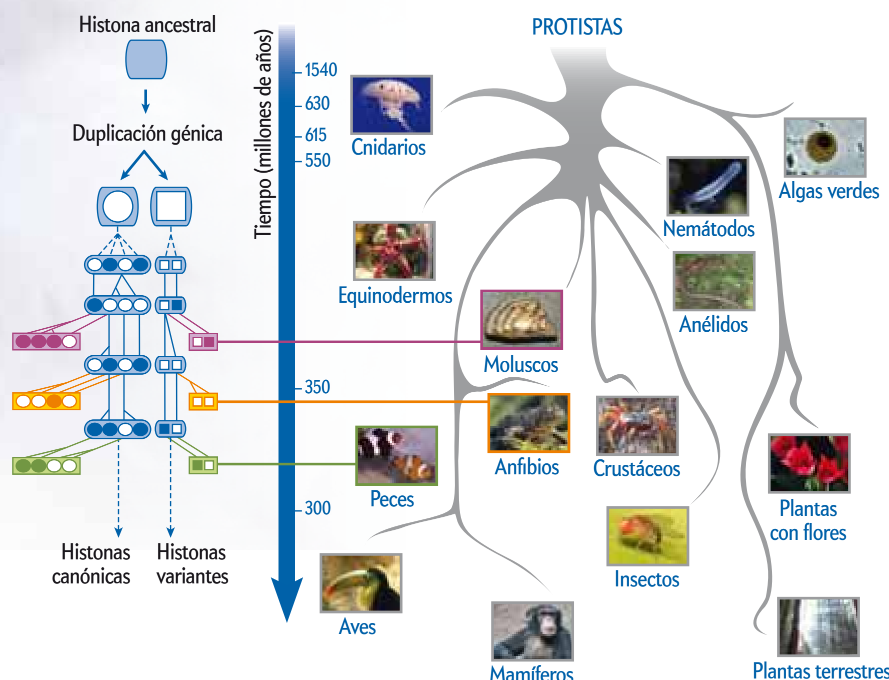
De los primeros nucleosomas a los actuales

Según los estudios de Harmit S. Malik y Steven Henikoff, del Centro de Investigación sobre el Cáncer Fred Hutchinson de Seattle, la evolución de las histonas procedió en tres etapas. Durante la primera se habrían diferenciado dos tipos de pseudohistonas, cuya asociación en un tetrámero podía compactar el ADN. En una segunda fase habrían aparecido cuatro clases de histonas, las cuales podían formar un octámero y empaquetar una gran cantidad de material genético. Por último, la duplicación recurrente de los genes de histonas habría permitido el incremento de su número de copias en el genoma. Ello hizo posible la expresión de una gran cantidad de histonas y trajo consigo la capacidad para empaquetar el ADN con enorme rapidez.

En esta figura se detallan los pasos evolutivos que condujeron a la aparición de histonas especializadas. El proceso se describe en términos de la evolución del pliegue de la histona (*histone fold*), una región de la proteína cuya estructura espacial facilita la unión de las histonas en el nucleosoma (*estructura con forma de H*). Gracias a la duplicación génica de este pliegue y su posterior subfuncionalización en cola terminal, las histonas adquirieron la capacidad clave de regular su interacción con el ADN.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES (*esquema*); DE: «COMPLETE GENOME SEQUENCE OF *METHANOTHERMUS FERVIDUS* TYPE STRAIN (V24S^T)», POR I. ANDERSON ET AL. EN *STANDARDS IN GENOMIC SCIENCES*, VOL. 3, N.º 3, 2010 [CC BY 3.0] (*Methanothermus fervidus*); MS:USER:PM MOON/WIKIMEDIA COMMONS [CC BY-SA 3.0](*Methanopyrus kandleri*); MASUR/WIKIMEDIA COMMONS (*Saccharomyces cerevisiae*); ROCKY MOUNTAIN LABORATORIES/NIAID/NIH (*Escherichia coli*)



El mecanismo evolutivo de nacimiento y muerte permitió la diferenciación y evolución independiente de las histonas canónicas (*círculos*) y variantes (*cuadrados*). Estas fueron asumiendo funciones específicas y propiciaron el aumento de la complejidad de las células y de los seres vivos. A lo largo de la evolución, los distintos linajes de histonas derivaron en los de especies concretas (*colores*).

homogéneas entre ellas ni entre los tejidos donde estos se expresan. La gran diversidad de variantes presentes en la familia H1, por ejemplo, contrasta con el moderado número de variantes de H2A y H3, así como con el bajo número de variantes de H2B y H4. Del mismo modo, el tejido germinal tiende a mostrar una diversidad de variantes mucho mayor que la línea celular somática.

COMPLEJIDAD CELULAR

La evolución mediante nacimiento y muerte queda representada de manera muy clara en el caso de la familia H1: su multitud de variantes se debe a una tasa elevada de nacimientos de genes, mientras que su especialización funcional en segmentos locales de la cromatina obedece a la selección de dicha diversidad.

Durante los últimos diez años, nuestro grupo ha abordado el estudio de las proteínas nucleares básicas del esperma (SNBP, por sus siglas en inglés), pertenecientes a la familia H1. Estas se encargan de facilitar el empaquetamiento organizado del ADN en el núcleo del espermatozoide, seis veces menor que el de una célula somática. Dichas proteínas surgieron hace unos 1000 millones de años. Si bien fueron identificadas en el núcleo de los espermatozoides a finales del siglo XIX, su origen evolutivo continuaba siendo un misterio. Nuestros resultados publicados en 2006 revelaron que las proteínas SNBP del esperma y las histonas H1 de las células somáticas compartían un origen evolutivo común a partir de una proteína H1 ancestral. Ello habría facilitado la aparición de la línea celular germinal y, con ello, la de la reproducción sexual.

Trabajos posteriores de nuestro grupo, realizados en 2008 y 2009, revelaron que las proteínas SNBP de la línea germinal siguieron un proceso evolutivo que propició la reducción progresiva de su tamaño y el incremento de su afinidad por el ADN, lo que permitió un empaquetamiento aún mayor en el núcleo de las células espermáticas. Nuestros estudios más recientes, publicados este mismo año, han demostrado que las proteínas SNBP y la familia de histonas H1 no solo comparten un origen evolutivo común, sino que, en ambos casos, su evolución ha estado gobernada por el mecanismo de nacimiento y muerte.

El origen del empaquetamiento del ADN en la cromatina del núcleo celular eucariota se remonta a hace más de 2000 millones de años. Esta estrategia de empaquetamiento ha demostrado ser una elección óptima para solucionar el problema evolutivo de la acumulación de material genético. Parece probable que otros mecanismos alternativos, menos eficientes, hayan sido eliminados por medio de la selección natural. Quizá la mayor ventaja de la cromatina se deba a su versatilidad y dinamismo, pues no solo constituye una solución arquitectónica de enorme eficiencia para organizar el material hereditario, sino también una base estructural y funcional susceptible de un sinnúmero de mejoras progresivas. La diversificación de los genes de histonas representa la base a partir de la cual se ha diferenciado un lienzo repleto de variantes funcionales especializadas. Ello ha permitido configurar mecanismos de empaquetamiento y regulación del ADN extremadamente precisos y coordinados. De este modo, la aparición y el progresivo refinamiento de dichos mecanismos moleculares han posibilitado la evolución de la complejidad celular y, en última instancia, la propia evolución de las especies.

PARA SABER MÁS

The language of covalent histone modifications. B. Strahl y C. D. Allis en *Nature*, vol. 403, págs. 41-45, 2000.

Concerted and birth-and-death evolution in multigene families. M. Nei y A. P. Rooney en *Annual Review of Genetics*, vol. 39, págs. 121-152, 2006.

Long-term evolution of histone families: Old notions and new insights into their diversification mechanisms across eukaryotes. J. M. Eirín López, R. González Romero, D. Dryhurst, J. Méndez y J. Ausió en *Evolutionary Biology: Concept, Modeling, and Application*, dirigido por P. Pontarotti, págs. 139-162. Springer Verlag, 2009.

Origin and evolution of chromosomal sperm proteins. J. M. Eirín López y J. Ausió en *Bioessays*, vol. 31, págs. 1062-1070, 2009.

The nucleosome family: Dynamic and growing. J. Zlatanova, T. C. Bishop, J. M. Victor, V. Jackson y K. E. van Holde en *Structure*, vol. 17, págs. 160-171, 2009.

Xenomar-Chromevol. Grupo de investigación de la estructura y evolución de la cromatina de la Universidad de La Coruña: **chromevol.udc.es**

por Carlos Domínguez, Jordi Grinyó y Josep-Maria Gili

Un estilo de vida

En el sedimento de las plataformas continentales abundan los organismos que se alimentan sobre todo de partículas en suspensión

Las plataformas continentales representan la zona de transición entre los ecosistemas costeros y el mar profundo. Los fondos marinos de estas plataformas constituyen zonas sedimentarias en las que se depositan todo tipo de partículas orgánicas e inorgánicas transportadas por las corrientes. Las partículas inorgánicas acumuladas durante miles de años en el sedimento configuran un hábitat singular dominado por organismos que viven en su superficie o parcialmente enterrados en él. Mediante diferentes sistemas de captación, se alimentan de las partículas orgánicas que se hallan en suspensión, motivo por el que se los conoce como organismos suspensívoros de fondos arenosos o fangosos. Estos invertebrados son muy cosmopolitas y se distribuyen a lo largo de toda la plataforma continental: desde unos pocos metros de profundidad, cerca de la costa, se extienden por una suave pendiente hasta llegar al talud continental, donde el cambio es brusco y el substrato se vuelve casi vertical.

Muchos de estos organismos suspensívoros forman agrupaciones más o menos densas, característica que necesitan para poder reproducirse, ya que los individuos o las colonias son de sexos distintos. Este mismo carácter gregario facilita la retención de las partículas transportadas por las corrientes, a la vez que permite que otros organismos, como las fases juveniles o larvarias de peces o crustáceos, encuentren alimento y refugio en este hábitat tan peculiar.

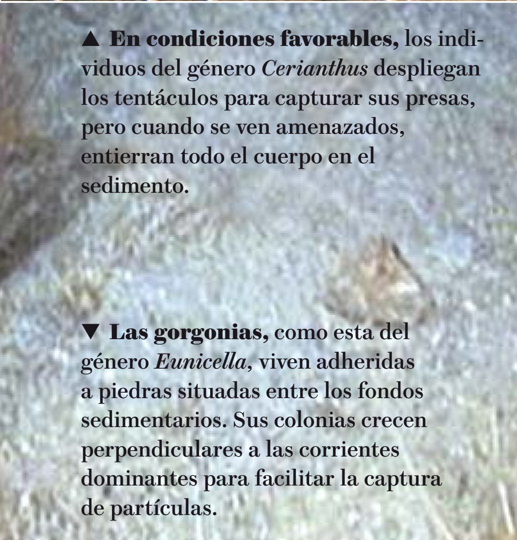


▲ **Colonia del coral blando** ***Alcyonium palmatum.*** **Presenta una parte enterrada, carente de pólipos, y otra emergida, en forma de mano, donde se alojan los pólipos filtradores.**

ICM/CSIC - IFM/GEOMAR (*Leptometra*), ICM/CSIC - GAVIN NEWMAN (*Alcyonium, Cerianthus, Eunicella y Pteroides*)



Fondo sedimentario de plataforma continental dominado por individuos del crinoideo *Leptometra phalangium.*



▲ **En condiciones favorables,** los individuos del género *Cerianthus* despliegan los tentáculos para capturar sus presas, pero cuando se ven amenazados, entierran todo el cuerpo en el sedimento.

▼ **Las gorgonias,** como esta del género *Eunicella*, viven adheridas a piedras situadas entre los fondos sedimentarios. Sus colonias crecen perpendiculares a las corrientes dominantes para facilitar la captura de partículas.





▲ **Los pennatuláceos** representan un grupo muy común en los fondos blandos de las plataformas continentales de todo el mundo. Ejemplares como este *Pteroeides spinosum* modifican su posición frente a la corriente para maximizar la captura de presas.

por María Jesús Santesmases

María Jesús Santesmases es investigadora en el Instituto de Filosofía del CSIC, en Madrid.



Biología y agricultura

Campo y artesanía en los orígenes de la genética

Poner en la mesa comida más barata, y más alimenticia, que la cena del día anterior ha sido uno de los objetivos de la experimentación agrícola. El cultivo selectivo de plantas se ha convertido en una fuente de alimentos y de acumulación de capital para quien lo ejerce con eficiencia. En las reconstrucciones históricas de la agricultura, la mejora de semillas ha quedado oculta tras el protagonismo de las innovaciones técnicas introducidas por los tractores y los herbicidas. Sin embargo, como advierte la historiadora de la agricultura Deborah Fitzgerald, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, las granjas agrícolas no se parecen a las fábricas y los agricultores están más cerca de los artesanos que de los fabricantes industriales. El proceso biológico de transformación vegetal sigue en el centro de la actividad agrícola.

De ahí que las principales innovaciones no mecánicas que se produjeron en la agricultura entre los siglos XIX y XX procedieran de experimentos llevados a cabo en centros de investigación, generalmente creados por los Gobiernos para contribuir a la mejora y eficiencia de los cultivos, así como a la prevención y tratamiento de plagas. Esas mejoras agrícolas han sido más intensas y peor estudiadas que las innovaciones técnicas derivadas de la mecanización de la siembra y la cosecha. Sucesivas innovaciones biológicas introducidas por la mejora de semillas reconstruyeron el sector agrícola y el ganadero; aumentaron la productividad mucho antes de la invención de lo que hoy se conoce como biotecnología. Las estaciones experimentales fueron laboratorios de la reconstrucción, que devolverían la prosperidad a los países europeos. Algunos de sus hallazgos tardarían casi dos décadas en manifestarse en la producción agrícola, pero constituyeron una de las bases de la mejora de los cultivos.

A la vista de lo anterior, puede proponerse una historia biológica de la agricultura, que se superpondría a esa otra historia más popular, la de los aparatos y máquinas en la siembra y la recolección. En ese espacio intermedio entre genética y agricultura se han desarrollado métodos e inventos con un impacto duradero en la cultura contemporánea.

El cultivo de plantas seleccionadas y la cría selectiva de animales corresponden a saberes y prácticas premodernas que se ejercían mediante la observación de seres vivos que engendraban otros semejantes; el cruzamiento selectivo mejoró la alimentación y contribuyó a las culturas contemporáneas de la biología, la nutrición, la salud y el medioambiente.

Estaciones experimentales

La experimentación agrícola se cruzó con la genética de plantas cultivadas y desplegaron la plasticidad suficiente como para adaptarse entre sí en ciertos momentos y lugares. Tal fue el caso del encuentro en Suecia entre el ingeniero agrónomo Enrique Sánchez Monge y la citogenética del trigo. Tras completar su formación en dos estaciones agronómicas portuguesas (Sacavem y Elvas), Sánchez Monge pasó tres meses de 1947 en la Estación Experimental de la Asociación Sueca de Semillas, en Svalöf, donde utilizó técnicas citológicas y de cultivos experimentales.

La estación de Svalöf era bien conocida por los agrónomos españoles, que la consideraban un referente para los mejoradores de plantas. Se hallaba directamente conectada con las necesidades agrícolas suecas. Se había creado en 1886 al servicio de la Asociación Sueca de Mejora de Semillas para ensayar en el clima nórdico semillas importadas. Tenía su propia revista y trabajaba en colaboración con la empresa que ponía las semillas en el mercado, lo cual daba a la estación un carácter práctico y comercial con impacto directo en la agricultura sueca.

Svalöf logró muy pronto reconocimiento internacional. Su programa de mejora de cultivos (cereales, patatas, verduras y flores) generó una colección enorme de semillas y desarrolló procedimientos sistemáticos para evaluar semillas y cultivos. El departamento de citogenética (dedicado a estudiar las células de las simientes) de Svalöf se había creado en 1931 con una ayuda de la Fundación Wallenberg. Su primer director fue el cerealista sueco Arne Müntzing, conocido por sus trabajos sobre la citogenética de cereales y director de la revista *Hereditas*. El departamento estaba asociado al Instituto de Genética de la Universidad de Lund, con el que compartía personal académico.

Sánchez Monge trabajó allí con el también agrónomo James MacKey, en una investigación sobre las bases cromosómicas que explicaran las formas singulares de ciertas variedades de trigo. Juntos publicaron en la revista sueca *Hereditas* el primer trabajo de Sánchez Monge en este órgano de la Sociedad Mendeliana de Lund, que logró desde su primer número en 1920 un gran impacto en los estudios sobre la herencia.

Los cromosomas se estudiaban en las células del polen. Estas se teñían y, al hacer presión con el pulgar, se extendían por la placa en la que se había colocado la muestra, que quedaba lista para observarse al microscopio. Este trabajo artesanal de preparación de las muestras fue el origen de las actuales prácticas de genética. Los cromosomas constituían el sitio celular de la herencia biológica y este el método para observarlos. Para denominar ese espacio de conocimiento y experimentación se manejaba entonces el término *herencia*, más antiguo y explorado que el que William Bateson había acuñado, *genética*, que se hallaba en vías de amplia aceptación.

A su regreso, Sánchez Monge dedicó la década siguiente, entre 1948 y 1958, a la investigación sobre el cultivo selectivo de cereales y su mejora, en la Estación Experimental Aula Dei que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas había creado a las afueras de Zaragoza. Ese proyecto era producto de una cultura investigadora en construcción, que combinaba el estudio de la reproducción celular en plantas con el cultivo experimental. Allí

comenzó el trabajo de Sánchez Monge dirigido a la obtención de triticales hexaploides, híbridos de trigo y cebada con 42 cromosomas. El trayecto hasta su obtención combinó los intereses de Sánchez Monge como mejorador de cultivos con las entonces nuevas técnicas citogenéticas usadas en las estaciones experimentales para generar nuevas variedades y nuevos híbridos.

La trayectoria de Sánchez Monge se desarrolló entre la biología y la agronomía, espacio que en ese momento resultaba prometedor para quienes investigaban en las estaciones experimentales de Europa y de América, y en los jardines coloniales de Asia. El período de entreguerras había sido muy productivo, sobre todo tras el redescubrimiento de las leyes de Mendel, aunque muchos mejoradores las desdeñaban o simplemente no las necesitaron para llevar a cabo sus investigaciones y pruebas.

De entre los genéticos y mejoradores de entonces, el ruso Nikolai Vavilov se considera uno de los grandes estudiosos de los orígenes geográficos y genéticos de los cereales europeos. Vavilov encontró lo que identificó como especie silvestre original del trigo en lo alto de una de las montañas de las repúblicas soviéticas, en una de sus numerosas expediciones por Europa y Asia que le permitieron trazar los orígenes geográficos de las plantas cultivadas en un libro que publicó en 1927. Vavilov fue contemporáneo de quienes se especializaron en el estudio de la herencia biológica. Murió en 1943, preso por el poder académico y político de Trofim Lysenko en la Rusia soviética que gobernaba Josef Stalin.



Enrique Sánchez Monge ante un cultivo experimental, ca. 1960.

ARCHIVO DE LA FAMILIA SÁNCHEZ MONGE

Nuevas variedades híbridas

Sánchez Monge regresó de Svalöf a la Estación Experimental Aula Dei, donde trabajó hasta 1958. En los años cuarenta del siglo pasado, España sufrió una de las sequías más severas de su historia y la miseria de la dictadura, que administraba la pobreza con cartillas de racionamiento y purgas políticas entre el funcionariado. Durante esos años, Sánchez Monge trabajó en un proyecto de obtención del triticale hexaploide. Su objetivo era desarrollar una variedad híbrida para cultivo de secano, mejorada para la fabricación de pan, de forma que fuera más resistente a la sequía que el trigo, y que al propio tiempo mantuviera la calidad. Por un lado, el proyecto sintonizaba con el discurso autárquico de las autoridades políticas; por otro, mantenía una actividad investigadora actualizada. La barrera política que levantó la dictadura en plena segunda posguerra mundial no detuvo completamente la circulación de saberes y prácticas experimentales en España.

Los primeros resultados de esos trabajos se presentaron en 1958, en el primer simposio internacional sobre genética del trigo, celebrado en la Universidad de Manitoba en Winnipeg, Canadá. En la facultad de agricultura de este centro, también Leonard H. Shebeski había iniciado un programa de investigación sobre triticales.

Sánchez Monge fue uno de los especialistas invitados al simposio por sus trabajos pioneros en triticale hexaploide. Cuando su cultivo superó la fase experimental, a mediados de los años setenta, empezó a cultivarse: se trataba de una variedad híbrida de trigo y cebada. En la actualidad sigue cultivándose en Europa, para alimentar al ganado.

La obtención de variedades cruzadas y la agricultura experimental diseñada en laboratorios con salida directa al campo se desarrollaron en colaboración con la genética: entre la artesanía y la ciencia de laboratorio estaba la tierra de labor. Agricultura y biología han compartido experimentos, han superpuesto deseos, se han formulado preguntas en colaboración y han programado agendas investigadoras porque compartían proyectos técnicos e intelectuales, y modos de observar las plantas y de intervenir en su producción mediante la modificación de las simientes.

La citogenética de plantas se presentaba en esos años como una gran promesa para la mejora de cultivos. Las necesidades técnicas de los laboratorios eran modestas: microscopios, plaquitas de cristal, tintes y mucha destreza experimental. En el cruce entre las prácticas de la citogenética botánica y agronómica, y lo que podría denominarse biología celular se encuentran los orígenes, a su vez, de la genética contemporánea. Esa genética guarda relación con la agricultura y la botánica porque de ambas proceden los métodos de trabajo y una buena parte de los conocimientos celulares.

Cuando las enormes superficies de cultivo de América del Norte usaban de forma masiva plaguicidas y herbicidas, la pionera bióloga Rachel Carson denunció el silencio del campo: los pájaros parecían desaparecer. Según su biógrafa Linda Lear, si la tierra calló, Rachel Carson no lo hizo. Su libro, *La primavera silenciosa*, publicado en 1962, fue el origen de la política de protección ambiental en Estados Unidos.

El crecimiento de las plantas y su estudio ha resultado ser no solo la base del alimento, el centro de un sector productivo que se encuentra en el origen de las sociedades humanas; también la experimentación de cultivos ha contribuido a mejorar la producción agrícola con efectos duraderos que hacen pensar en una historia de la biología en la agricultura, que sería la historia de lo que el conocimiento biológico debe a la botánica, a la experimentación agrícola y a la propia agricultura.

PARA SABER MÁS

Historia agraria de la España contemporánea. El fin de la agricultura tradicional (1900-1960). Dirigido por Ramón Garrabou, Carlos Barciela López y José Ignacio Jiménez Blanco. Crítica, Barcelona, 1986.

El pozo de todos los males. Sobre el atraso en la agricultura española contemporánea. Josep Pujol, Manuel González de Molina, Lourenzo Fernández Prieto, Domingo Gallego y Ramón Garrabou. Crítica, Barcelona, 2001.

Every farm a factory: The industrial ideal in American agriculture. Deborah Fitzgerald. Yale University Press, 2003.

La primavera silenciosa. Rachel Carson. Crítica, Barcelona, 2010.

por Timothy Searchinger



Timothy Searchinger es investigador en la Universidad de Princeton. Centra su trabajo en los biocombustibles y otros temas ambientales relacionados con la agricultura.

Remedio de urgencia para la crisis alimentaria

Para detener el aumento de precios, debería ponerse coto a los biocombustibles

En 2007, cuando los precios de los alimentos iniciaron su escalada, hasta llegar a lo más alto en 2008, los políticos y los medios de comunicación denunciaron el impacto que tendrían sobre unos 1000 millones de personas ya famélicas. Un año excepcionalmente bueno para los cultivos, de cosechas excelentes, alivió el problema por un tiempo. Después, los precios han vuelto a dispararse hasta cifras récord. Ahora se les presta mucha menos atención.

El sufrimiento de los desheredados no perdura largo tiempo en la memoria de la gente, pero de ello no son del todo inocentes los expertos. Son tantas las pegas que han puesto los economistas, han insistido tanto en la complejidad de la crisis alimentaria, que han logrado que se asemejara a uno de esos problemas intratables, como la pobreza o la enfermedad, tan fáciles de recluir en el desván de nuestra mente. Ese análisis es erróneo.

Obviamente, aliviar el hambre en un mundo lanzado hacia más de 9000 millones de almas en 2050 constituye un problema de suma complejidad, que exige un amplio repertorio de soluciones. Pero tan grave problema es distinto, y no guarda relación con la súbita escalada de los precios alimentarios. Los precios del crudo, y la debilidad del dólar, aunque encarecen los costes de producción, no explican, ni de lejos, por qué los precios mayoristas de los alimentos se han duplicado desde 2004. Las subidas de precio actuales reflejan que la oferta es insuficiente para cubrir la demanda y fuerza a los consumidores a pujar unos contra otros para asegurarse el suministro. Los beneficios de las explotaciones, que se han disparado, y los precios de las tierras respaldan esta explicación. ¿A qué se debe tal desequilibrio?

No es que la producción agrícola haya disminuido: el año pasado, la masa total de los cereales producidos en el mundo fue la tercera en importancia de todos los tiempos. De hecho, la producción viene creciendo desde 2004 a un ritmo que, en promedio, supera al de la estimación de la tendencia a largo plazo calculada desde 1980, e iguala, sensiblemente, a las tendencias del decenio anterior. A pesar incluso de que en Rusia y en el norte de Australia la climatología fue adversa el año pasado, los rendimientos medios de los cultivos, a escala mundial, fueron solo un 1 por ciento inferiores a lo que sería de esperar según las tendencias: una modesta desviación.



El problema emana, pues, del rápido crecimiento de la demanda. El saber convencional le atribuye origen asiático, pero no es así. China ha contribuido algo a tensar los mercados en los dos o tres últimos años, pues ha importado más haba de soja y ha recortado las exportaciones de cereales para reforzar sus reservas: que sirva de aviso a los navegantes. Pero el consumo en China y en India no está creciendo a mayor ritmo que en decenios anteriores. En términos generales, se puede afirmar que el aumento de renta en Asia no ha desencadenado la demanda de alimentos.

El papel estelar corresponde a los biocombustibles. A partir de 2004, los biocombustibles derivados de cultivos casi han duplicado la tasa anual de crecimiento de la demanda global de cereales y azúcares, y elevado en torno a un 40 por ciento la demanda de aceites vegetales. En Tailandia, la yuca está desplazando a otros cultivos, porque China la importa para producir etanol.

La creciente demanda de maíz, trigo, haba de soja, azúcar, aceites vegetales y yuca le disputa a otros cultivos una superficie limitada; lo hará, al menos, hasta que los campesinos hayan tenido tiempo para despejar bosques o terrenos de pastos, trasladando, así, las tensiones de cierto tipo de mercado a otros. En términos globales, la agricultura mundial puede atender la creciente demanda si el clima es favorable, pero ya en la temporada de 2010, con un tiempo moderadamente adverso, fue necesario, excepto en China, recurrir a las reservas, dejando los almacenes casi exhaustos. Siendo escasas las reservas y creciente la demanda, sea para alimentación o para combustibles, existe el riesgo de insuficiencias más acusadas en la oferta. Se disparan los precios.

La mayoría de los expertos reconoce el importante papel de los biocombustibles, pero a menudo infravalora sus efectos. Muchos interpretan mal los modelos económicos, que subestiman la presión que los biocombustibles ejercen en los precios. Casi todos estos modelos están diseñados para pronosticar los efectos de los biocombustibles a largo plazo sobre los precios, tras haber tenido los agricultores tiempo para despejar y cultivar más tierra, y no mencionan los efectos a corto plazo. Los comentaristas, por su parte, tienden a integrar en una sola todas las fuentes de demanda de producción agrícola, sin considerar ni su muy diferente importancia moral ni su posible control. Nuestra obligación primera es alimentar a los hambrientos, y los biocombustibles están minando nuestra capacidad para hacerlo. Los Gobiernos pueden detener el repetitivo patrón de las crisis alimentarias dando fin a sus insaciables demandas de biocombustibles.

JOHN ZOINER, GETTY IMAGES

por Pere Castells



Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

La xantana, el espesante del futuro

La capacidad de espesar en frío o en caliente, junto con su gran poder estabilizante de emulsiones y espumas lo convierten en un producto único

La goma xantana es un heteropolisacárido producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*. Se descubrió a finales de los cincuenta del siglo xx en los laboratorios de investigación del Departamento de Agricultura estadounidense. En 1980, Europa agregó la xantana a la lista de aditivos alimentarios permitidos, con el número E-415, lo que confirmó su uso en alimentación.

La industria alimentaria empezó a utilizarlo para espesar y, sobre todo, para mejorar la estabilidad de emulsiones y espumas. Además, se descubrió que, mezclado con otros hidrocoloides como la goma garrofín, tenía la capacidad de formar geles. Hoy se utiliza también para dar consistencia a productos bajos en calorías.

No fue hasta 2004 cuando la xantana comenzó a introducirse en la cocina de los restaurantes. Desde entonces ha causado una auténtica revolución, puesto que ofrece propiedades únicas: presenta una función espesante (la principal) en frío y en caliente; proporciona alta viscosidad a bajas concentraciones y gran estabilidad ante variaciones de temperatura; puede actuar en soluciones alcalinas, ácidas y muy salinas; y aguanta ciclos de congelación y descongelación. Y además, constituye un extraordinario estabilizante para emulsiones.

Con semejante carta de presentación, no es de extrañar que los grandes cocineros fueran aplicando la xantana a sus elaboraciones. Aprovechaban, sobre todo, su poder espesante en frío; ello les permitía preparar salsas, cremas y sopas de productos líquidos sin tener que calentar, etapa imprescindible en las técnicas espesantes tradicionales, basadas en la aplicación de harinas o almidones. De ahí que las salsas de frutas y verduras en frío —por tanto, con todos sus aromas— abunden hoy en numerosos restaurantes.

También se ha sacado provecho de otras dos propiedades de esta goma. Por un lado, el efecto suspensor, que permite mantener suspendidas en el seno de un líquido pequeñas partículas (que no sedimentan debido a la elasticidad del líquido). De ahí surgió un plato mítico de El Bulli, *Melón con jamón* (2005), en el que se depositaban en un caldo de jamón espesado con goma xantana esferificaciones de melón. Por otro, el efecto de retención de gas. Este se aplicó en las *Ostras con cava* (2006) del Celler de Can Roca (*fotografía*), donde la goma xantana se introducía en el cava para que, aparte de espesar y producir una salsa, retuviera el gas. Esta aplicación atrajo el interés del sector del cava, debido a las posibilidades de elaborar un producto espeso, la salsa de cava, con capacidad de aguantar el gas en el interior. En la actualidad se comercializa un producto de estas características, en el que la xantana se introduce durante el proceso de elaboración del cava.

Todas esas aplicaciones han atraído la atención de numerosos científicos. Entre las últimas investigaciones destacan la de Prawta Chantaro y Rungnaphar Pongsawatmanit, de la Universidad Kasetsart, en Bangkok, y la de Carolina P. Kechinski, Andrea B. Schumacher y sus colaboradores, de la Universidad de Río Grande del Sur, en Porto Alegre. La primera, publicada en *Journal of Food Engineering* de mayo de 2010, analiza las influencias térmicas y de textura que se producen al mezclar xantana con almidón de tapioca en presencia de azúcar. La segunda, publicada en *Food Hydrocolloids* en mayo de 2011, investiga el comportamiento de la goma xantana en la reología de los purés de arándanos con fructosa. Estos y otros estudios han cosechado resultados que facilitarán el desarrollo de nuevos productos en los años venideros.

Pero las aplicaciones más importantes del espesante de marras son quizá las que se están llevando a cabo a nivel social. La xantana permite elaborar numerosos platos que mejoran la dieta de personas con intolerancias y alergias. Se aplica en elaboraciones hipocalóricas. También en preparados de harinas para celíacos. La goma xantana es un sustituto excelente del gluten porque, al ser un espesante elástico, confiere esponjosidad y firmeza. Una vez cocidas, las masas que contienen xantana no se rompen ni desmigan, problemática que sí presentan algunas masas sin gluten.

Destaca también la aplicación de la xantana en dietas para personas con problemas de deglución (disfagia). Las elaboraciones con goma xantana (cremas de frutas, verduras, carnes y pescados) son más fáciles de tragar debido a su viscosidad y elasticidad. En una sociedad cada vez más envejecida, la alimentación de ancianos con disfagia constituirá una de las prioridades de las poblaciones futuras.

Pero no todo es tan fácil como parece. Una de las ventajas que ofrece la xantana es al propio tiempo un inconveniente. Al presentar un gran poder espesante, basta una cantidad muy reducida de xantana para variar la viscosidad del producto original. Mientras se requieren proporciones de entre el 4 y el 8 por ciento de harina o almidón para lograr espesores notables, la xantana lo resuelve con proporciones de entre el 0,4 y el 0,8 por ciento. Ello implica que deben utilizarse balanzas de mayor precisión, lo que dificulta su aplicación y comercialización a escala doméstica. Con todo, es posible que se acaben encontrando soluciones para conseguir que un producto con tantas ventajas culinarias llegue a nuestras casas.



EL CELLER DE CAN ROCA

Sarah Simpson es escritora y colaboradora de *Scientific American*.



GEOLOGÍA

RIQUEZA MINERAL DE AFGANISTÁN

Los yacimientos recién descubiertos en el asediado país podrían cubrir la demanda mundial de tierras raras y minerales críticos y a su vez derrocar la hegemonía local del opio

Sarah Simpson

A PRIMERA VISTA, LA ESCENA GUARDA SEMEJANZA con tantas otras que se producen a diario en el sur de Afganistán, en la «zona roja» devastada por la guerra: dos helicópteros Black Hawk descienden sobre una ladera, cerca de la frontera sur con Pakistán. Al aterrizar, marines estadounidenses armados con fusiles saltan a tierra. Pero con ellos bajan también geólogos ataviados con cascos y pesados chalecos de cerámica.

«En cuanto desciendes, asumes tu función como geólogo, casi te olvidas de que estás rodeado por marines», dice Jack H. Medlin, director de las campañas del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. (USGS) en Afganistán.

El equipo de Medlin ha realizado numerosas misiones en helicóptero, que no duran más de una hora para evitar que las fuerzas hostiles dispongan de tiempo para organizarse y bajar. Un intervalo fugaz y acuciante para los geólogos, que en condiciones normales necesitarían días para muestrear y cartografiar un área con detalle. Las formaciones rocosas que contienen elementos químicos deseados, como oro o neodimio, suelen hallarse intercaladas entre otras rocas de menor interés. Todas ellas se depositaron en el pasado y, a lo largo del tiempo, se plegaron, quedaron enterradas y volvieron a aflorar, por lo que hoy aparecen dispersas en diferentes puntos, tal vez en barrancos muy erosionados o en las laderas opuestas de un valle profundo. Seguir su rastro exige experien-

EN SÍNTESIS

Escoltados por militares, un equipo de geólogos estadounidenses ha cartografiado los yacimientos de minerales críticos de Afganistán. En el sur del país, donde el control talibán es más estricto, existen reservas minerales con un alto contenido en tierras raras.

Si se comenzara la explotación de minerales valiosos en el norte, el éxito provocaría un impulso económico y político que se propagaría hacia el sur. Las nuevas estimaciones podrían triplicar los cálculos iniciales sobre la cantidad de tierras raras.

La superación de la hegemonía del opio y el régimen talibán gracias a los beneficios de la minería podría cambiar la política exterior de EE.UU. y la estabilidad mundial. A largo plazo, los geólogos afganos deberán tomar el relevo.

MOISES SAMAN, REDUX PICTURES



Las inhóspitas montañas del sur de Afganistán podrían albergar suficientes tierras raras para abastecer al planeta durante años.

cia, concentración y resistencia física. Los marines saben que sus protegidos buscan pistas como sabuesos, así que el círculo humano sigue los pasos de los científicos.

La última de estas audaces campañas se llevó a cabo en febrero y demostró que el riesgo había merecido la pena. Reveló la existencia de un valioso alijo de tierras raras, los denominados minerales críticos, que se han vuelto esenciales en la fabricación de alta tecnología y cuyo suministro está menguando en EE.UU. y otros países. El valor del preciado yacimiento es equiparable al del principal lugar de extracción en China.

Desde hacía tiempo los geólogos tenían indicios de que Afganistán albergaba vastas reservas de minerales críticos sin explotar, valoradas en miles de millones o incluso billones de dólares. Los políticos sabían que si los minerales se podían extraer en cantidades enormes, las ganancias permitirían la transición de la economía afgana hacia una menor dependencia de la producción de opio, lo que a su vez fortalecería la estabilidad política del país. Pero antes de que las compañías mineras comiencen a excavar, debe evaluarse si el valor de los yacimientos compensa los gastos de su explotación. Realizar dicha estimación exige un arduo trabajo: tomar muestras y cartografiar las formaciones rocosas con todo detalle. Con sus arriesgadas expediciones en el país, el USGS ha recopilado una ingente cantidad de información. Tras consultar con Medlin los datos más recientes, los altos cargos del Departamento de Defensa y el Departamento de Estado de EE.UU. están convencidos de que la riqueza mineral de Afganistán podría ayudar a transformar el país. De ahí que se haya desatado una especie de fiebre por el subsuelo afgano. Una de las principales compañías mineras de China se ha hecho con un vasto yacimiento de cobre y se ha embarcado en una operación que supone una inversión de 2900 millones de dólares, lo que representa el mayor proyecto de desarrollo en Afganistán. Por su parte, EE.UU. ha centrado su interés en el oro, mientras que la mayoría de las compañías indias (casi dos docenas) apuestan por el hierro.

Medlin y otros expertos del USGS opinan que la enorme concentración de minerales y su accesibilidad podrían convertir el país en uno de los centros mineros más importantes del planeta. En particular, Afganistán podría representar un proveedor clave de tierras raras, al tiempo que China va acaparando sus propias reservas. Por otro lado, se desconoce cuándo estarán dispuestos los inversores extranjeros a extraer los minerales. El terreno estudiado en febrero se halla en la región sur del país, la más violenta y bajo el control talibán más estricto. Sin embargo, si se comienza la extracción de cobre y otros metales en el norte, el arranque de la actividad minera podría disparar una intensa «fiebre del oro» económica y política. Esta terminaría con la supremacía del opio y el bastión talibán, lo que conllevaría un cambio radical en las acciones militares y la política exterior de EE.UU. y asestaría un golpe al terrorismo.

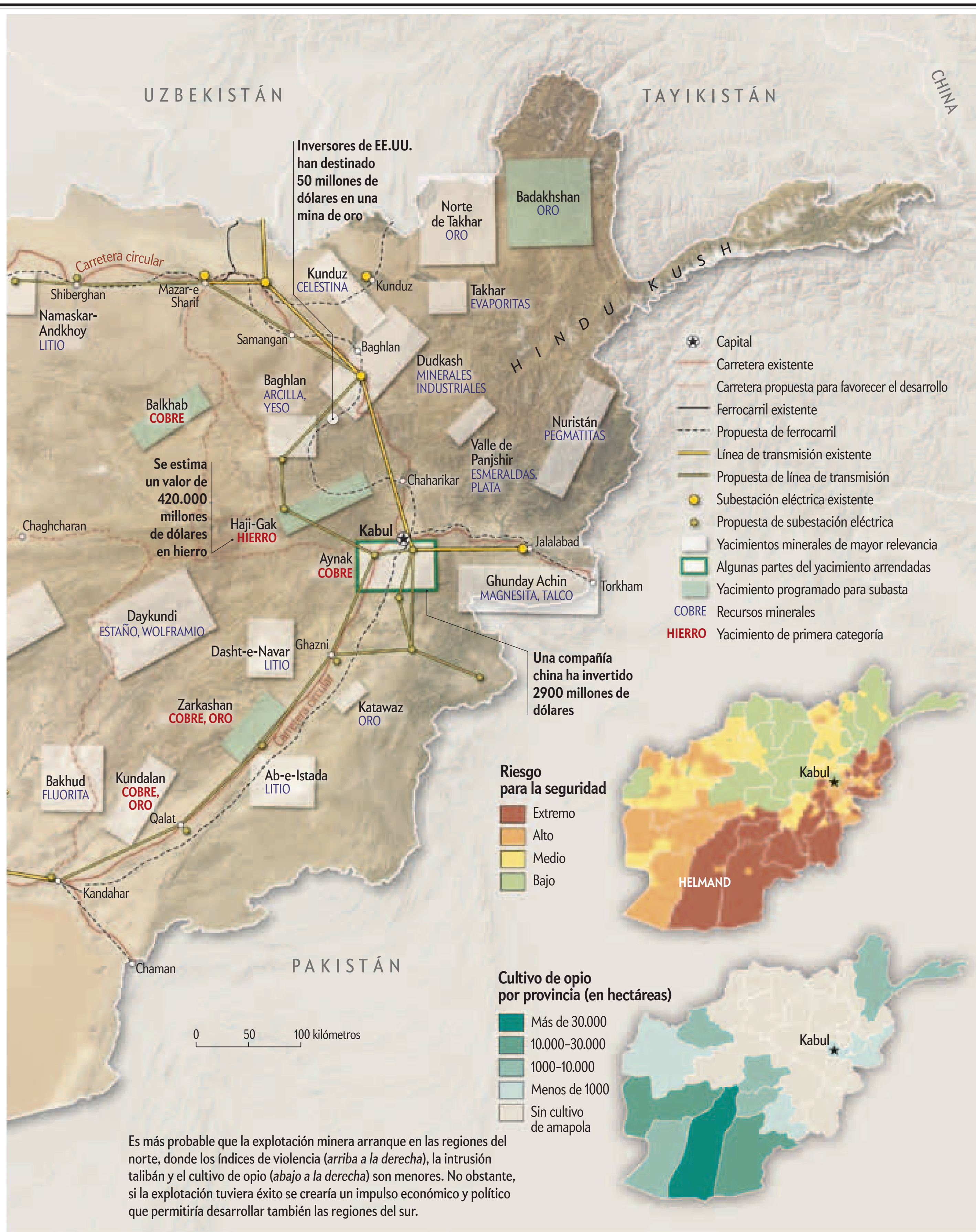
Tales perspectivas no se habrían considerado en serio si no se hubiera contado con el trabajo de los geólogos en zona de guerra, una proeza que hasta día de hoy se había mantenido en secreto. A lo largo de siete años, Medlin y otros 50 científicos del USGS han explorado Afganistán y han formado a geólogos locales para que puedan realizar la misma tarea por su cuenta. El grupo de Medlin volverá a Kabul en los próximos meses para ayudar a los geólogos afganos a interpretar los últimos informes y llevar a cabo estimaciones prácticas sobre decenas de depósitos minerales recién descubiertos. Por otro lado, se está planeando estudiar más a fondo los yacimientos de

La promesa de Afganistán como centro minero mundial

El subsuelo de Afganistán alberga una asombrosa variedad de minerales. Siete de sus yacimientos se consideran de primera categoría (*mayúsculas en rojo*). Basados en los resultados de las últimas investigaciones, los altos cargos políticos estiman que la minería podría estabilizar la economía del país y reducir la fuerte dependencia de la ayuda internacional y del tráfico ilegal de opio. Algunas naciones ya han invertido en dos lugares y se ha programado que salgan a subasta otros seis (*leyenda*). Sin embargo, deberán mejorarse las infraestructuras. La explotación de una sola mina de gran extensión podría dar empleo a decenas de miles de afganos.



FUENTES: USGS (*imagen de fondo e información sobre recursos minerales*); DEPARTAMENTO DE SEGURIDAD DE LAS NACIONES UNIDAS, INFORME DE 2010 SOBRE EL OPIO AFGANO, RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES, OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS CONTRA LA DROGA Y EL DELITO (*niveles de seguridad*); GOBIERNO DE AFGANISTÁN, INFORME DE 2010 SOBRE EL OPIO AFGANO, RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES, OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS CONTRA LA DROGA Y EL DELITO (*cultivo de opio*); XNR PRODUCTIONS (*mapa*).



Es más probable que la explotación minera arranque en las regiones del norte, donde los índices de violencia (*arriba a la derecha*), la intrusión talibán y el cultivo de opio (*abajo a la derecha*) son menores. No obstante, si la explotación tuviera éxito se crearía un impulso económico y político que permitiría desarrollar también las regiones del sur.

tierras raras, ya que se sospecha que podrían extenderse más de lo que dejan entrever los cálculos iniciales.

TIERRAS RARAS

Durante decenios, la mayoría de las afirmaciones que se hacían sobre la riqueza mineral de Afganistán representaban meras conjeturas. En 2007, el equipo de Medlin identificó las 24 regiones con mayor potencial minero distribuidas por las áridas llanuras y montañas afganas. Sus conclusiones se fundaban en la integración minuciosa de todos los trabajos de campo sin publicar realizados antes de la era soviética y durante la misma. Los Gobiernos de EE.UU. y Afganistán apenas conocían esos datos, hasta que Paul A. Brinkle los sacó a la luz hace dos años. Brinkle, subsecretario de Defensa de EE.UU. que había supervisado los esfuerzos del Pentágono para negociar con Iraq y Afganistán, estimó que los minerales podrían constituir la estrategia más eficaz para combatir el opio, así que solicitó la ayuda de Medlin. Este era consciente de que se necesitarían datos científicos más sólidos para tentar a las compañías mineras a apostar por el subsuelo afgano. Las empresas suelen invertir grandes sumas de dinero para evaluar la conveniencia de explotar un yacimiento y la mayoría no correría el riesgo de enviar a sus científicos a una zona de guerra.

Tal fue la misión que el equipo de Brinkle encomendó a Medlin en 2009. Desde entonces, el USGS ha utilizado imágenes de satélite, técnicas de teledetección y trabajo de campo bajo protección militar para revisar las estimaciones previas e identificar nuevos yacimientos. Hoy Medlin asegura que al menos seis de los depósitos metálicos son equiparables a los explotados en las minas más productivas del planeta.

Las rocas con un alto contenido en tierras raras se hallan cerca del núcleo de un volcán extinguido en las áridas llanuras del sur de la provincia de Helmand, no muy lejos de la población de Khanneshin. Los científicos del USGS se aventuraron a visitar el volcán, en plena zona roja, motivados en parte por las dudas de que la industria internacional pudiera satisfacer la creciente demanda de elementos críticos. En la actualidad, China acapara el 97 por ciento de la producción mundial de tierras raras. El hecho inquieta a otros países industriales, sobre todo a la vista del reciente recorte de sus exportaciones a Japón. La demanda global de otros minerales también se halla en alza, y los precios aumentan con ella. Hace una década, el cobre costaba cerca de 175 céntimos de dólar por kilogramo. Hoy el valor asciende a unos 9 dólares.

En dos de sus expediciones escoltadas al volcán, el equipo de Medlin trató de verificar las teorías de la época soviética que aseguraban la existencia en aquella zona de rocas que contenían metales de gran valor. En febrero, el equipo descubrió una extensa formación rocosa con un alto contenido en tierras raras ligeras, entre ellas el cerio, que se emplea en la fabricación de pantallas planas de televisión, y el neodimio, utilizado en la elaboración de imanes de alta potencia para coches híbridos.

Por el momento, el equipo ha cartografiado 1,3 millones de toneladas de las rocas de interés en el área de Khanneshin, las cuales contienen una cantidad de tierras raras suficiente para abastecer al mundo durante diez años. El Pentágono ha valorado los yacimientos en unos 7400 millones de dólares. Además, en la zona podrían existir depósitos de otros elementos críticos valorados en 82.000 millones de dólares. Si se dispusiera de más tiempo para investigar sobre el terreno y de datos geofísicos sólidos, se cree que se descubriría un volumen de yacimientos de tierras raras dos o tres veces superior. Los geólogos han divisado, al otro lado de un valle profundo que no tuvieron tiempo de explorar, lo que parecía la continuación de la misma formación rocosa. Las imágenes aéreas tomadas a gran altura, que permiten calcular las variaciones en el magnetismo y la densidad de las rocas subyacentes, indican que el material de interés también parece extenderse en profundidad.

No obstante, el inicio de cualquier labor minera en el volcán de Khanneshin deberá esperar algunos años. Afganistán posee una escasa experiencia en la industria pesada y las zonas rurales apenas disponen de infraestructura ferroviaria y energía eléctrica. Pero esos inconvenientes no representan el problema más importante. Las principales compañías mineras están acostumbradas a iniciar explotaciones en regiones subdesarrolladas, como ya han hecho en zonas remotas de Indonesia, Chile o Australia. El principal factor que podría echar atrás a las empresas es la necesidad de contar con medidas de seguridad. En julio, las fuerzas de la coalición transfirieron el control de Lashkar Gah, la capital de la provincia, a las fuerzas afganas, con lo que la seguridad en la región se ha vuelto aún más inestable.

METALES PESADOS

Según Medlin, de momento resulta más razonable centrarse en el norte del país, donde el peligro es menor, para realizar las inversiones multimillonarias que exigen el inicio de una explotación minera. En esa región existen yacimientos de cobre, oro y hierro todavía sin explotar, valorados en cientos de miles de millones de dólares. El Ministerio de Minería de Afganistán está dispuesto a promover el interés por la apropiación de sus recursos minerales. En 2007, el Grupo Metalúrgico de China dio el primer paso y obtuvo un contrato de arrendamiento para explotar el yacimiento de cobre de Aynak, en las montañas al sur de Kabul. La compañía había calculado que obtendría unos beneficios de 43.000 millones de dólares. De ahí su decisión de construir, por un lado, dos plantas eléctricas que alimentaran el equipamiento minero y complementaran la red energética regional, y por otro, una parte de la red ferroviaria para conectar la mina con la líneas existentes más al norte, en las antiguas repúblicas soviéticas.

Pero cualquier otro interés por los minerales afganos quedó estancado hasta que Brinkley apareció en escena. Sobre la base de los últimos datos del equipo de Medlin, el Pentágono hizo reavivar el interés al contratar a una importante consultora minera para que recopilara información sobre los lugares más prometedores y la presentara en un formato que resultara atractivo para los inversores extranjeros. El año pasado el esfuerzo dio sus frutos. Unos inversores occidentales, encabezados por J. P. Morgan Capital Markers, destinaron 50 millones de dólares en una pequeña explotación artesanal de oro en un valle alpino al este de Mazar-e Sharif. Su objetivo consiste en abrir a comienzos del próximo año una mina que se gestionará con trabajadores locales y equipamiento moderno.

Pronto podrían tomarse nuevas iniciativas. Con ayuda del Pentágono y el Banco Mundial, el Ministerio de Minería de Afganistán pretendía subastar a finales de este año otros seis yacimientos minerales de interés. El primero de ellos podría representar el negocio más lucrativo del país: el yacimiento de hierro de Haji-Gak, un terreno montañoso situado a unos 130 kilómetros al oeste de Kabul. Valorado en la descomunal suma de 420.000 millones de dólares, podría reportar al Gobierno unos beneficios anuales de 300 millones de dólares y dar empleo a 30.000 personas, según el ministerio afgano. Como gran parte de la riqueza enterrada en el subsuelo del país, algunos sectores





Los geólogos Said Mirzad (*extremo izquierdo*) y Stephen Peters rastrean el sur de Afganistán en busca de tierras raras mientras los marines estadounidenses los protegen de ataques talibanes. Los yacimientos de cobre (*arriba*), mucho más al oeste, podrían alcanzar un valor de 29.000 millones de dólares.

CORTESÍA DE USGS

de este vasto depósito, que aflora entre rocas oscuras fácilmente visibles, se habían descubierto hace más de un siglo. Sin embargo, Afganistán no ha contado nunca con los recursos, la disposición y la estabilidad necesarias para emprender una operación minera de gran envergadura. Ahora, con la atracción de los inversores extranjeros, se ha dado el primer paso. A comienzos de septiembre empezaban las pujas de las 23 compañías mineras internacionales que a finales del año pasado habían expresado su interés al gobierno de Afganistán.

EL RELEVO

Para cerrar con éxito estas y otras negociaciones se requieren nuevas exploraciones geológicas, de las que deben encargarse los científicos afganos. Cuando el USGS llegó al país por primera vez, su principal objetivo fue (y todavía es) poner al día a los geólogos locales en materia de ciencia actual y tecnología de la información. En él se centran Medlin y Said Mirzad, un geólogo afgano-estadounidense colaborador del USGS que había visitado el yacimiento de hierro de Haji-Gak hacía más de 30 años, cuando dirigía el Servicio de Inspección Geológica de Afganistán. Mirzad había pensado entonces en la posibilidad de transportar el hierro en camiones desde Haji-Gak hasta Pakistán o de construir una acería local. Pero la invasión soviética en 1979 y la consecuente ocupación truncaron su sueño. Los soviéticos aprisionaron a Mirzad en múltiples ocasiones antes de que finalmente huyera a EE.UU. con su mujer y sus dos hijos en 1981. La actividad científica del país quedó paralizada durante las siguientes décadas de conflictos.

La invasión de EE.UU. en 2001 modificó tal situación. Tres semanas después de los atentados del 11 de septiembre, Mirzad y Medlin recibieron autorización (y más tarde financiación de la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional, USAID) para ayudar a los afganos a determinar los recursos naturales que yacían en su subsuelo y para formar a científicos locales que más tarde pudieran asesorar a su Gobierno sobre la explotación de los mismos. Esa tarea forma parte de las actividades habituales del USGS, que ha contribuido ya a que decenas de países en conflicto reconstruyan sus sectores de recursos naturales. El equipo de Medlin apenas conocía el potencial excepcional de los yacimientos afganos de cobre y tierras raras, por lo que estos todavía no se contemplaban como riquezas que pudieran reemplazar al opio.

En la primera visita del USGS a las oficinas del Servicio de Inspección Geológica de Afganistán en Kabul, en 2004, el equipo tan solo halló un barracón bombardeado y agujereado que carecía de puertas, agua y electricidad. Aun así, cerca de un centenar de geólogos e ingenieros acudían a trabajar unas horas al día, principalmente para ordenar informes que habían ocultado en sus casas durante el régimen talibán. Muchos de ellos obtenían sus ingresos como taxistas o vendedores de tabaco. Afortunadamente, su formación básica como científicos era muy buena. Pero desconocían los avances científicos y técnicos que se habían desarrollado desde el inicio de los años ochenta.

Uno de los conceptos fundamentales en que se profundizó fue la teoría de la tectónica de placas. Esta considera que la corteza terrestre se divide en bloques que se desplazan y colisionan entre sí. La teoría explica el origen de los terremotos, las erupciones volcánicas o la formación de montañas. Permite entender también por qué Afganistán, con una superficie poco menor que la de Francia, exhibe una inusual riqueza mineral. Gran parte del actual territorio interior se formó como resultado de las colisiones de cuatro o cinco fragmentos de corteza. Los mayores yacimientos metálicos del planeta tienden a ubicarse a lo largo de estos márgenes convergentes.

Entre otras misiones, los científicos pretenden realizar una campaña geológica exhaustiva en el volcán Khanneshin. El equipo de Medlin, junto con el Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU., había realizado campañas aéreas a gran altura en un avión NP-3D. Mediante la elaboración de mapas del campo magnético terrestre y otras propiedades, los geofísicos construyeron imágenes tridimensionales de los diez kilómetros superficiales del sustrato rocoso de Afganistán. Con vuelos más lentos y a menor altura se podrían realizar, con los mismos instrumentos, observaciones más detalladas y determinar la profundidad de ciertos yacimientos. El valor de las tierras raras, cifrado en 7400 millones de dólares, se ha estimado al considerar una formación rocosa de unos 100 metros de espesor. Pero esa magnitud podría superarse con creces. Medlin se había propuesto comprobarlo en una campaña, pero nunca pudo contar con las medidas necesarias de seguridad para llevarla a cabo. Por ello, convenció a Brinkley de que comprara al Servicio de Inspección Geológica de Afganistán el mismo tipo de instrumentos que pueden emplearse sobre el terreno. Por su parte, Medlin está invitando a geólogos afganos a EE.UU. para que aprendan su manejo.

Medlin y Mirzad están satisfechos con la renovación de las oficinas del Servicio de Inspección Geológica de Afganistán en Kabul. Hoy alberga un centro de datos digitales que recoge el conocimiento actual y proporciona 100 empleos a jornada completa a científicos e ingenieros que llevan a cabo campañas de inspección mineralógica de forma autónoma. Medlin apunta que gracias a los últimos trabajos de campo realizados por los científicos afganos en un depósito de cobre cerca de Dusar-Shaida, el yacimiento será objeto de próximas apuestas internacionales.

UN GRAN RETO

El progreso de las investigaciones demuestra la posibilidad de obtener beneficios económicos de la explotación minera en Afganistán y, por primera vez, los inversores están a punto de adquirir compromisos. Aun así, algunos afganos manifiestan preocupación y se preguntan si la minería resultará provechosa para los habitantes del país. Las principales explotaciones mineras en otros países pobres han representado más una maldición que una bendición. El descubrimiento de petróleo en Nigeria hace más de cincuenta años ha supuesto ganancias de miles de millones de dólares a las petroleras y al Gobierno, pero la mayoría de los nigerianos vive todavía con un dólar al día. El desarrollo podría incentivar aún más la resurgencia talibán y la corrupción política. Medlin fomenta la transparencia como una «exigencia ineludible» para hacer frente a esos riesgos. Todos los datos recopilados con esmero por el USGS están en posesión del Gobierno afgano, que permite al Gobierno estadounidense acceder a la información a través de Internet.

La protección del ambiente despierta también inquietud. En numerosas regiones del planeta donde se realizan grandes explotaciones mineras a cielo abierto, las autoridades se enfrentan al problema de eliminar los contaminantes acumulados durante decenios. Las técnicas habituales para extraer las tierras raras producen desechos que contienen uranio y otros residuos radiactivos peligrosos para la salud. Para que Afganistán pueda transformarse en uno de los principales centros mineros del planeta sin padecer consecuencias similares se debe actuar con previsión y responsabilidad.

La tarea de abordar esos retos y la decisión sobre los yacimientos que merece la pena explotar recaerán a partir de ahora en los científicos afganos. La financiación que recibía el USGS por parte del Pentágono finalizaba en octubre, al iniciarse el nuevo año fiscal, y, en ausencia de protección militar, a los investigadores del USGS les resultará casi imposible realizar trabajo de campo. Los científicos afganos pueden desplazarse con mayor libertad y el equipo de Medlin hará lo posible para asesorarles a medida que obtengan nuevos datos. Para mantener el impulso de las investigaciones, Medlin ha obtenido 8,7 millones de dólares del USAID para continuar procesando las imágenes de satélite y otros datos de teledetección que el USGS ha recopilado con el fin de identificar los yacimientos más prometedores.

Todavía no está claro si los científicos recién formados y los políticos podrán seguir adelante con el desarrollo económico. Afortunadamente, las rocas pueden esperar. Tienen todo el tiempo del mundo.

PARA SABER MÁS

Servicio Geológico de Afganistán: **www.bgs.ac.uk/afghanminerals**
Ministerio de Minería de Afganistán: **mom.gov.af/en**
Fuerza Operacional de Estados Unidos para Operaciones de Comercio y Estabilidad: **tfbso.defense.gov**
Proyectos del USGS en Afganistán: **afghanistan.cr.usgs.gov**

TIERRAS RARAS Y MINERALES CRÍTICOS

Satisfacer la demanda mundial

Mark Fischetti

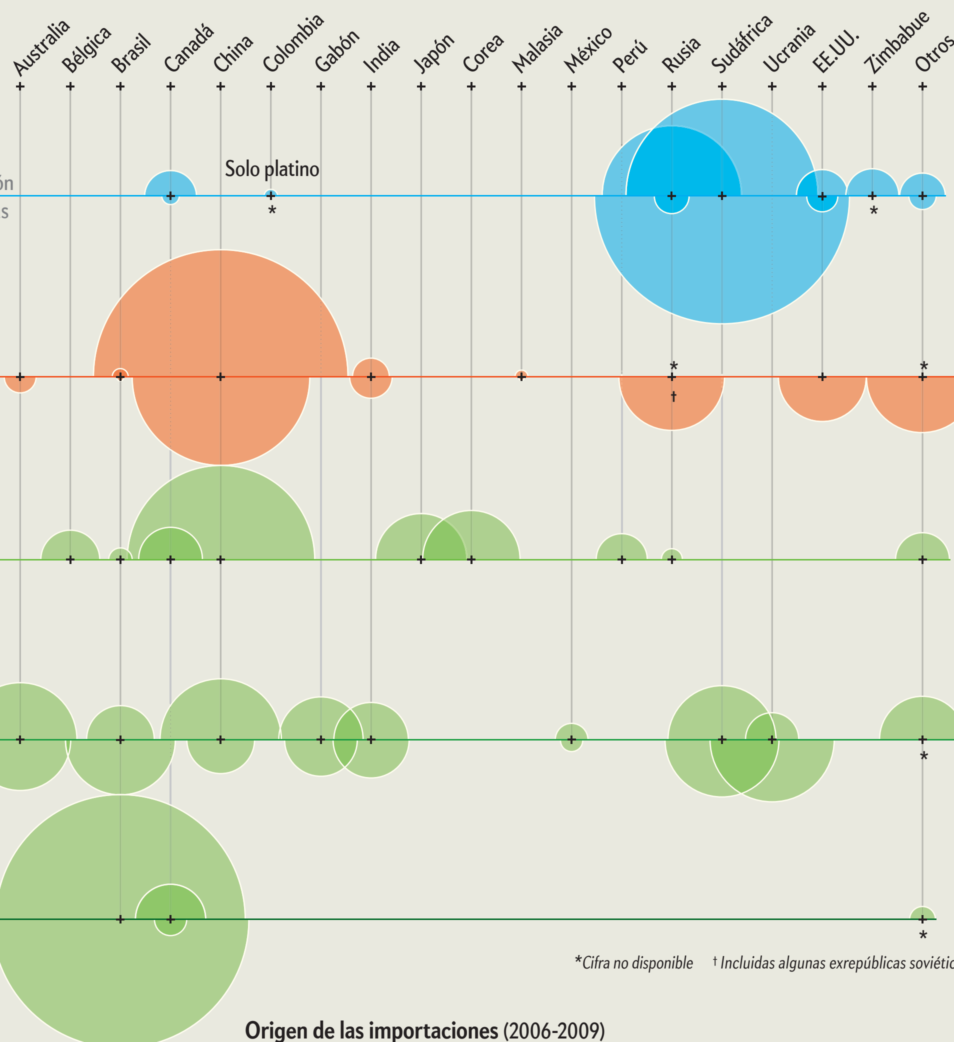
Unos pocos países controlan la producción mundial de numerosos minerales hoy en día esenciales en la fabricación de alta tecnología: el europio se emplea en las pantallas de televisión y el neodimio en los discos duros de ordenador. Algunos países, como China, han comenzado a acaparar sus recursos para destinarlos a sus propias compañías. Como consecuencia, los países industrializados sienten inquietud sobre el abastecimiento de «elementos críticos», minerales cuyo suministro se halla limitado. Los 6 elementos del grupo del platino, 17 elementos de tierras raras, así como el indio, el manganeso y el niobio, son los más cruciales para EE.UU., según el Servicio de Inspección Geológica del país. El espectro de naciones que los poseen (*arriba a la derecha*) y la dependencia de EE.UU. de las importaciones (*abajo a la derecha*) podrían afectar a la economía del país y a su seguridad (en el caso de productos militares) si se restringe el comercio o no se descubren nuevos yacimientos. Para conocer el papel que pueden desempeñar los recursos afganos, seguramente muy abundantes, es necesario proseguir con las labores de cartografía.

¿Para qué se emplean?

GRUPO DEL PLATINO	
Platino:	Catalizadores, electrónica, tratamientos químicos
Paladio:	Catalizadores, condensadores, sensores de monóxido de carbono
Rodio:	Catalizadores, tratamientos químicos
Rutenio:	Contactos electrónicos y resistencias, superaleaciones
Iridio:	Bujías, aleaciones, tratamientos químicos
Osmio:	Contactos electrónicos, microscopía electrónica, implantes quirúrgicos
TIERRAS RARAS	
Escandio:	Componentes aeroespaciales, aleaciones de aluminio
Itrio:	Láseres, pantallas de TV y ordenador, filtros de microondas
Lantano:	Refinado de petróleo, baterías de coches híbridos, lentes de cámaras
Cerio:	Catalizadores, refinado de petróleo, producción de lentes de vidrio
Praseodimio:	Motores de avión, lámparas de arco de carbono
Neodimio:	Discos duros, teléfonos móviles, imanes de alta potencia
Prometio:	Aparatos portátiles de rayos X, baterías nucleares
Samario:	Imanes de alta potencia, etanol, limpieza de circuitos impresos (PCB)
Europio:	Pantallas de TV y ordenador, láseres, electrónica óptica
Gadolinio:	Terapia oncológica, agente de contraste en la resonancia magnética
Terbio:	Electrónica de estado sólido, sistemas de sónar
Disprosio:	Láseres, barras de reactores nucleares, imanes de alta potencia
Holmio:	Imanes de alta potencia, láseres
Erbio:	Fibra óptica, barras de control de reactores nucleares
Tulio:	Aparatos de rayos X, superconductores
Iterbio:	Aparatos portátiles de rayos X, láseres
Lutecio:	Tratamientos químicos, diodos LED
OTROS ELEMENTOS CRÍTICOS	
Indio:	Pantallas de cristal líquido, semiconductores, películas solares
Manganeso:	Producción de hierro y acero, aleaciones de aluminio
Niobio:	Producción de acero, aleaciones aeroespaciales

¿Quién las posee?

Producción mundial y reservas calculadas (2010)



PLATINO Y PALADIO

Producción total:
380 toneladas
Reserva total:
66.110 toneladas

TIERRAS RARAS

Producción total:
133.600 toneladas
Reserva total:
113.778.000 toneladas

INDIO

Producción total:
574 toneladas
Reserva total:
Cifras no disponibles

MANGANESO

Producción total:
12.920.000 toneladas
Reserva total:
619.000.000 toneladas

NIOBIO

Producción total:
63.000 toneladas
Reserva total:
2.946.000 toneladas

**Cifra no disponible* *† Incluidas algunas exrepúblicas soviéticas*

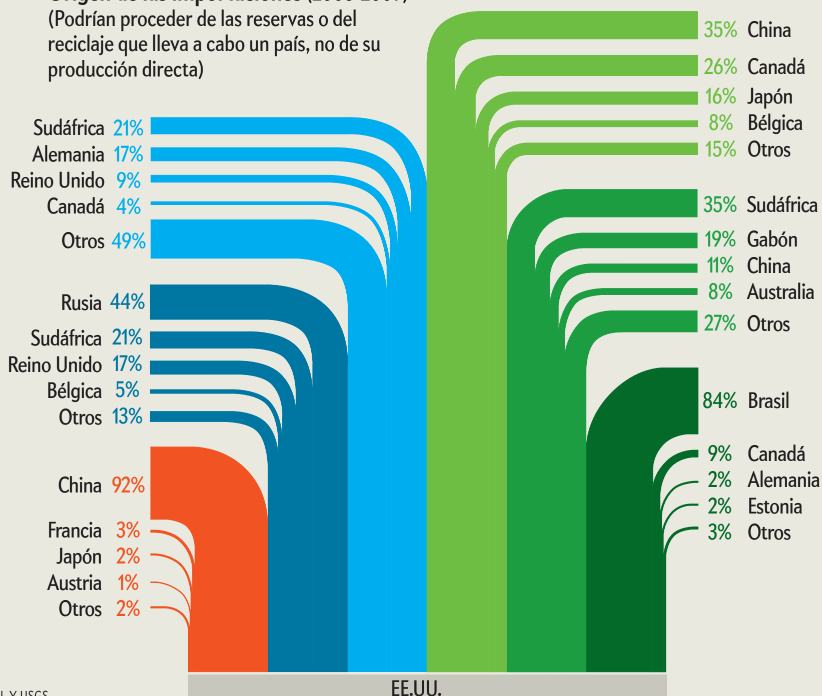
Abastecimiento de EE.UU.

Dependencia de las importaciones (2006-2009)



Tierras raras: China acapara cerca del 97 % de la producción mundial de óxidos de tierras raras. La principal fuente estadounidense de esos minerales, la mina Mountain Pass en California, cerró en 2002. La empresa Molycorp Minerals retomará allí la producción en 2012, pero ni ella ni otras compañías contarán con la infraestructura necesaria para refinar los óxidos y convertirlos en productos útiles. Según la Oficina General de Contabilidad de EE.UU. (GAO), reconstruir esa cadena de suministro podría llevar hasta 15 años.

Origen de las importaciones (2006-2009)
(Podrían proceder de las reservas o del reciclaje que lleva a cabo un país, no de su producción directa)



FUENTE: INFORME DE 2011 SOBRE RECURSOS MINERALES, DEPARTAMENTO DE INTERIOR DE EE.UU. Y USGS

JEN CHRISTIANSEN



Eric von Hofe ha desarrollado su carrera en biotecnología y ha investigado nuevas terapias contra el cáncer. Preside la empresa Antigen Express en Worcester, Massachusetts.

MEDICINA

Vacunas contra el cáncer

En Estados Unidos se ha aprobado la primera vacuna para tratar la enfermedad y se están desarrollando otros fármacos semejantes. La inmunoterapia oncológica está entrando en una nueva era

Eric von Hofe

Durante décadas, los oncólogos han ofrecido a sus pacientes tres tratamientos principales: cirugía, quimioterapia y radioterapia. (Algunas personas que han sobrevivido al cáncer se refieren con sarcasmo a ese duro régimen como «cortar, envenenar y quemar».) A lo largo de los años, el perfeccionamiento de esas técnicas sin duda agresivas ha hecho más llevaderos los efectos secundarios más graves. Al mismo tiempo, su eficacia ha aumentado de forma notable. Incluso se dispone de nuevos medicamentos específicos (Herceptin y Gleevec) contra ciertos tipos de cáncer. Si consideramos el conjunto de los tumores invasivos, la tasa media de supervivencia a cinco años ha aumentado de un 50 a un 66 por ciento en los últimos treinta y tantos años. Pero a pesar de esos avances, muchos de los que han logrado superar un cáncer no poseen una esperanza de vida normal.

Durante tiempo se ha buscado una estrategia que, sin provocar efectos secundarios graves, permitiera alargar la vida de los pacientes al instigar a sus propias defensas a combatir mejor las malignidades. Pero decenios de esfuerzo no han hecho sino encadenar un fracaso tras otro. En los años ochenta del siglo pasado, la esperanza de que el interferón, una molécula del sistema inmunitario, activara las defensas del organismo contra todos o casi todos los tipos de cáncer se desvaneció tras pocos años de estudios. A pesar

DAN SAELINGER



de sus importantes aplicaciones actuales, el interferón no se ha convertido en el curalotodo que entonces se creyó. Durante la primera década de este siglo se emprendieron numerosos ensayos clínicos en los que se utilizaban estrategias con vacunas muy diversas, pero ninguna parecía funcionar. Daba la impresión de que la tan esperada arma contra un amplio espectro de tumores nunca se materializaría.

Y aún no lo ha hecho. Pero en verano de 2010 ocurrió algo que hace pensar que la época de arrancadas en falso y callejones sin salida está llegando a su fin: la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos aprobó la primera vacuna contra el cáncer. El fármaco, Provenge, no cura la enfermedad pero, combinado con la quimioterapia estándar, ya ha proporcionado unos meses más de vida a cientos de hombres con cáncer de próstata avanzado.

Ese giro positivo en los acontecimientos tuvo lugar después de que se reexaminasen ciertas suposiciones básicas sobre el modo en que el sistema inmunitario luchaba contra las células cancerosas, así como la manera en que los tumores se defendían de dicho ataque. Hoy en día los oncólogos se muestran optimistas y creen en la posibilidad de desarrollar nuevos tratamientos, muy específicos, que estimulen el sistema inmunitario. Al emplearlos de forma sistemática junto con la cirugía, la quimioterapia y la radioterapia, se podría vencer al cáncer sin desencadenar efectos secundarios peores que un fuerte resfriado.

UN NUEVO ALIADO

Muchos de nosotros nos centramos en las vacunas terapéuticas contra el cáncer. A diferencia de las vacunas habituales, que evitan la proliferación de agentes infecciosos, posibles causantes de daños cerebrales (sarampión), parálisis (polio) o cáncer de hígado (hepatitis B), las vacunas terapéuticas contra el cáncer entrenan al organismo para que reconozca y destruya las células cancerosas existentes en los tejidos y para que mantenga a raya a las nuevas mucho después de finalizar el tratamiento.

Pero hablar sobre el desarrollo de tales medicamentos resulta más fácil que llevarlo a la práctica. La mayoría de las vacunas preventivas desencadenan una sencilla respuesta de anticuerpos que protege contra numerosas infecciones. Al unirse a los virus de la gripe, por ejemplo, los anticuerpos evitan la infección de las células. Sin embargo, las respuestas basadas en anticuerpos no son lo bastante fuertes como para destruir las células cancerosas. Para realizar esa tarea, el sistema inmunitario necesita estimular un grupo concreto de células, los linfocitos T, de los que se distinguen dos tipos principales. Para diferenciar uno de otro se hace referencia a sus receptores, CD4 o CD8, unas proteínas características que se localizan en la parte externa de la membrana celular. Los linfocitos T que expresan receptores CD8 son los mejor especializados en la destrucción de células cancerosas, siempre que se les enseñe a reconocerlas como peligrosas. (Los linfocitos T que presentan receptores CD8 se designan CD8+.)

A pesar de ese panorama complejo, la creación de una vacuna contra el cáncer no constituye una idea nueva. En los años postreros del siglo XIX, mucho antes de tan siquiera oír hablar de una célula CD8+, William B. Coley empezó a inyectar a enfermos de cáncer una sustancia que acabó recibiendo el nombre de toxina de Coley. Al trabajar como cirujano ortopédico en el que hoy en día se denomina Centro Oncológico Conmemorativo Sloan-Kettering, en la ciudad de Nueva York, Coley se sentía intrigado por los informes de pacientes que en apariencia habían superado un cáncer tras haber sufrido un breve brote de una infección potencialmente mortal. En un intento por simular la infección al tiempo que eliminaba su letalidad, Coley preparó una disolución en la que mezclaba dos cepas de bacterias mortíferas. Calentó suavemente la preparación para que las bacterias murieran y se volvieran inofensivas. Pero la mezcla aún contenía una cantidad suficiente de proteínas bacterianas como para desencadenar una respuesta en los pacientes, que contraían fiebres muy altas.

Coley sostenía la hipótesis de que la fiebre elevada activaría el sistema inmunitario deprimido de los enfermos, que así podría reconocer y atacar los crecimientos anormales que se producían en el organismo. Mediante inyecciones diarias de bacterias muertas, cada vez más concentradas, alargó la duración de las fiebres en sus pacientes y, de modo sorprendente, observó un aumento de la supervivencia a largo plazo. Coley argumentó, con parte de razón, que la toxina había funcionado como una suerte de vacuna contra el cáncer.

Sin embargo, durante la década de los cincuenta del siglo XX, los médicos empezaron a obtener resultados más uniformes con la quimioterapia. A medida que las toxinas bacterianas de Coley fueron cayendo en desuso, la idea de crear vacunas contra el cáncer se paró en seco.

Pero el estudio del sistema inmunitario y de su posible papel en el cáncer no se detuvo. De forma gradual, fueron acumulando datos que respaldaban la hipótesis, propuesta por Paul Ehrlich en 1909, de que el sistema inmunitario vigila y destruye sin cesar las células cancerosas que se van formando. La denominada teoría de la vigilancia inmunitaria cosechó aún más credibilidad durante los años ochenta, después de calcular que la elevada frecuencia de mutaciones espontáneas observada en

EN SÍNTESIS

Desde la década de los setenta del siglo XX, los tratamientos tradicionales contra el cáncer (cirugía, quimioterapia y radioterapia) han permitido prolongar la vida de los enfermos, pero muchos aún no alcanzan una esperanza de vida normal.

Se piensa que los resultados podrían mejorar si se contara con un nuevo aliado contra el cáncer: el propio sistema inmunitario del organismo.

Durante el último decenio, los intentos encaminados a estimular la respuesta inmunitaria de manera artificial (mediante la vacunación u otros fármacos) han fracasado.

Pero la situación parece estar cambiando. Se ha aprobado una vacuna para tratar el cáncer de próstata y se está ensayando una nueva generación de vacunas terapéuticas contra el cáncer.

PERSEVERANCIA

La larga marcha

La estimulación del sistema inmunitario para ayudarlo a combatir el cáncer ha necesitado décadas de investigación.

Década de 1890
William B. Coley activa el sistema inmunitario de enfermos de cáncer inyectándoles mezclas de bacterias muertas.

1909
Paul Ehrlich sugiere que el sistema inmunitario podría detener el desarrollo de los tumores.



AP PHOTO

1975
Se crean los anticuerpos monoclonales, lo que permite el desarrollo de herramientas inmunológicas muy específicas.

las células humanas debería haber dado lugar a muchos más tumores malignos de los que se detectaban en realidad. De alguna manera, el organismo descubría y destruía continuamente numerosas células cancerosas por su cuenta.

Incluso cuando un tumor escapaba de la destrucción, el sistema inmunitario seguía luchando, aunque con menor efectividad. Desde hacía tiempo los patólogos se habían percatado de que los tumores solían contener células inmunitarias infiltradas, lo que hizo pensar en ellos como «heridas que no se curaban». Nuevos experimentos demostraron que, a medida que crecía, el tumor iba liberando cada vez más sustancias que eliminaban de forma activa los linfocitos T. La cuestión consiste ahora en saber diseñar vacunas contra el cáncer que inclinen la balanza a favor de los linfocitos T y los ayuden a erradicar el tumor.

Un primer paso en esa dirección se realizó en 2002, cuando un equipo del Instituto Nacional del Cáncer (NCI) de EE.UU. demostró que otro tipo de linfocito T, la célula CD4+, desempeñaba una función esencial en la respuesta defensiva contra el cáncer. Las células CD4+ actúan como «generales» del sistema inmunitario: dan órdenes a los «soldados de a pie», las células CD8+, sobre el objetivo que deben atacar y destruir. El equipo del NCI, liderado por Steven Rosenberg, extrajo linfocitos T de 13 pacientes con melanoma avanzado que presentaban metástasis (los tumores se habían esparcido por todo el cuerpo). En un tubo de ensayo, los investigadores activaron de manera selectiva los linfocitos extraídos para que dirigiesen su ataque contra las células del melanoma. A continuación, cultivaron las células activadas en grandes cantidades y las reintrodujeron en el paciente. La estrategia del equipo del NCI, conocida como inmunoterapia adoptiva, representa, de hecho, una suerte de autotrasplante de células inmunitarias (modificadas artificialmente en el exterior del organismo). Difiere, por tanto, de la vacunación, que hace que el sistema inmunitario genere en el propio cuerpo células específicas para combatir el cáncer.

Con anterioridad se había comprobado que la inmunoterapia adoptiva solo con células CD8+ no desencadenaba el efecto deseado. Pero cuando el equipo del NCI añadió células CD4+ a la mezcla, se obtuvieron resultados extraordinarios. El tamaño de los tumores se redujo de forma espectacular en seis pacientes; además, el análisis sanguíneo de dos de ellos demostró que, nueve meses después de haber finalizado el tratamiento, seguían fabricando por su cuenta células inmunitarias anticancerosas. Los enfermos tratados experimentaron síntomas parecidos a los de la gripe, aunque cuatro de ellos también padecieron una compleja reacción autoinmunitaria que les provocó la pérdida de pigmentación en algunas partes de la piel.

Los resultados del NCI ofrecían pruebas convincentes de la teoría planteada: se podía estimular una respuesta inmunitaria de linfocitos T con la suficiente precisión como para destruir tumores. En el experimento, el número de células inmunitarias clonadas necesarias para cada paciente era abrumador: más de 70.000 millones de células CD8+ y CD4+, lo que suponía un volumen de varios cientos de mililitros. Pero, por lo menos, la comunidad científica tenía ahora la certeza de la eficacia de la inmunoterapia contra el cáncer. El siguiente paso consistía en averiguar una forma de obtener el mismo resultado pero de un modo más simple, sin tener que extraer células del organismo, cultivarlas en gran cantidad y después reinyectarlas. En otras palabras, ayudar a que el organismo generase por sí solo la mayoría de las células que necesita, igual que hace cuando responde a una vacuna eficaz.

MÚLTIPLES ESTRATEGIAS

Mi equipo de la empresa Antigen Express recibió con satisfacción los resultados del grupo de Rosenberg. Demostraban que para que una vacuna contra el cáncer tuviera éxito debía estimular a la vez células CD4+ y CD8+. Nuestros estudios con animales nos habían llevado a argumentar lo mismo, y casi nos habíamos jugado el futuro de la compañía con esa convicción.

Para fabricar una vacuna contra el cáncer se necesitan tres pasos. El primero, determinar la característica molecular, o antígeno, de un tumor maligno que el sistema inmunitario reconocerá como foránea y por tanto intentará destruir. El segundo, decidir cómo administrar un agente desencadenante (o vacuna) que lleve al sistema inmunitario a atacar a las células cancerosas. Y el tercero, elegir los pacientes y el momento propicio en el curso de la enfermedad para administrar la vacuna.

Durante los últimos años, la industria biotecnológica ha estudiado una amplia gama de proteínas y fragmentos de proteínas (péptidos) como posibles incitadores de una respuesta inmunitaria robusta capaz de destruir células cancerosas. (Otras posibles formas de provocar un ataque consisten en utilizar fragmentos de material genético que codifiquen proteínas del tumor o incluso células cancerosas enteras, después de irradiarlas.) Las alteraciones genéticas que dan lugar a la proliferación descontrolada de las células cancerosas las llevan, asimismo, a sintetizar cantidades de proteínas muy superiores a lo habitual. Unas diez compañías, incluida la nuestra, han seleccionado algunos de esos

1980
Se inserta en bacterias un gen que codifica el interferón. Ello permite la producción a gran escala de esta molécula estimuladora del sistema inmunitario.



1986
La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU. da el visto bueno al interferón, la primera inmunoterapia de eficacia probada contra el cáncer, para tratar la leucemia de las células pilosas.

1997
La FDA aprueba el primer tratamiento contra el cáncer basado en anticuerpos monoclonales, con el nombre comercial de Rituxan, para el linfoma no-Hodgkin.

1998
La FDA aprueba el anticuerpo monoclonal Herceptin para el tratamiento del cáncer de mama metastásico.



2002
Investigadores del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU. demuestran que es posible un tratamiento contra el cáncer basado en linfocitos T. Este requiere la participación de dos tipos de células inmunitarias: los linfocitos T CD8+ (*en la imagen, uno de ellos, en amarillo, ataca a una célula cancerosa, en rosa*) y los linfocitos T CD4+.

2010
La FDA aprueba Provenge, contra el cáncer de próstata avanzado, la primera vacuna diseñada para incitar un ataque sobre un tumor ya existente.

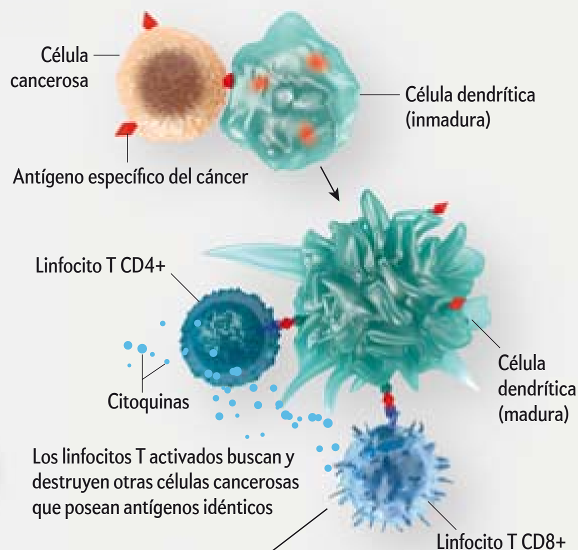
GARY RETHERFORD, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*interferón*); PHOTO RESEARCHERS, INC. (*linfocito*)

Tres estrategias para obtener vacunas terapéuticas

El sistema inmunitario no suele reconocer las células cancerosas como peligrosas o foráneas, como sí lo hace con los microorganismos. Se ha demostrado la posibilidad de estimular las defensas mediante la introducción en el organismo de una gran cantidad de células inmunitarias, los linfocitos T, cultivados de modo artificial en el exterior del mismo. Pero los científicos preferirían desarrollar una vacuna terapéutica que preparase al sistema inmunitario para que desplegase por sí solo un vigoroso ataque antitumoral. Abajo se ilustran tres de las estrategias que las compañías biotecnológicas están abordando para lograr este objetivo.

Respuesta inmunitaria celular contra el cáncer

Un tipo de célula inmunitaria, la célula dendrítica, ingiere una célula tumoral. A continuación, presenta unas sustancias del tumor, los antígenos (*en rojo*), a otros dos tipos de células inmunitarias, los linfocitos T CD8+ y los linfocitos T CD4+. Los CD4+ liberan moléculas de citoquinas que ayudan a activar los CD8+, que se ven así empujados a atacar a otras células que posean el mismo antígeno. Por desgracia, la respuesta no es siempre lo bastante fuerte como para destruir un tumor entero.



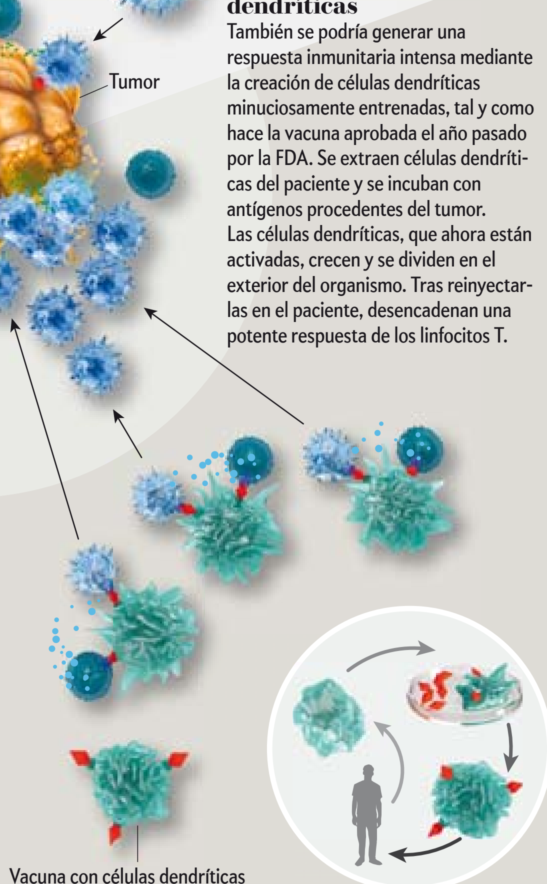


Vacuna con células enteras

Una manera de incitar una respuesta eficaz consiste en entrenar al sistema inmunitario para que luche contra una célula cancerosa entera. Se extraen células del tumor de un paciente, se introduce en ellas material genético para poder identificarlas mejor y a continuación se las irradia. Las células cancerosas muertas se reinyectan en el enfermo, lo que ofrece al sistema inmunitario numerosos objetivos a los que atacar.

Vacuna con células dendríticas

También se podría generar una respuesta inmunitaria intensa mediante la creación de células dendríticas minuciosamente entrenadas, tal y como hace la vacuna aprobada el año pasado por la FDA. Se extraen células dendríticas del paciente y se incuban con antígenos procedentes del tumor. Las células dendríticas, que ahora están activadas, crecen y se dividen en el exterior del organismo. Tras reinyectarlas en el paciente, desencadenan una potente respuesta de los linfocitos T.





Vacuna peptídica

La manipulación de los antígenos específicos del cáncer los vuelve muy visibles ante el sistema inmunitario. Debido a que los fragmentos proteicos resultantes, o péptidos, se pueden sintetizar sin tener que utilizar ningún tejido del paciente, la fabricación de una vacuna peptídica eficaz resultaría mucho más barata que otras estrategias basadas en células.

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

péptidos y han cumplido con los dos primeros requisitos para crear una vacuna contra el cáncer: identificar un agente desencadenante y saber cómo administrarlo.

Una parte del interés que despiertan las vacunas peptídicas reside en el tamaño reducido de los fragmentos proteicos, su síntesis poco costosa y su fácil manipulación, por lo que se pueden incluir en la formulación de una vacuna que se fabrique en grandes cantidades. Además, como los péptidos identificados se presentan en numerosos pacientes con distintos tipos de cáncer, se pueden utilizar en formulaciones que ayudarían a muchas personas. Los médicos no se verían obligados entonces a componer vacunas individualizadas para cada paciente, como hacen con las inmunoterapias basadas en células. Por último, todas las vacunas peptídicas ensayadas hasta la fecha provocan efectos secundarios bastante leves, como una irritación temporal en el lugar de la inyección y, quizá, fiebre o algún otro síntoma gripal.

Hace diez años, Antigen Express realizó unas modificaciones cruciales en un péptido que se utilizó en una vacuna experimental contra el cáncer de mama. Conocida como HER2, la proteína representa también la diana sobre la que actúa Herceptin, un tratamiento contra ciertos tipos de cáncer de mama basado en anticuerpos monoclonales. Nuestro grupo descubrió que, al añadir tan solo cuatro aminoácidos al péptido, este aumentaba de modo espectacular la estimulación de las células CD4+, así como de las CD8+, para que combatieran las células cancerosas que sintetizaban la proteína HER2. Los resultados preliminares, publicados a principios de este año en un estudio independiente que comparaba nuestra vacuna HER2 mejorada con otras dos vacunas peptídicas diseñadas para estimular solo a las células CD8+, son esperanzadores.

Algunas compañías como Dendreon, fabricante del Provenge (recientemente aprobado por la FDA), hicieron una apuesta distinta. Su estrategia consistió en proporcionar sustancias específicas de las células cancerosas a un tipo de células inmunitarias, las células dendríticas. Diseminadas por todo el organismo, en particular en los tejidos que se hallan en contacto con el exterior (como la piel o el revestimiento del tubo digestivo), esas células actúan como los centinelas del sistema inmunitario y forman parte de la primera línea de defensa que se encarga de alertar a los linfocitos T de que algo anda mal. Sin embargo, como las células inmunitarias solo admiten órdenes de otras genéticamente iguales a ellas, hay que extraer de cada enfermo las células dendríticas necesarias para el tratamiento; a continuación, hay que introducir en ellas la proteína específica del cáncer y, por fin, volverlas a inyectar en el paciente. El coste de un tratamiento completo asciende a unos 93.000 dólares. Entre sus efectos secundarios se incluyen escalofríos, fiebre, cefalea y, con menor frecuencia, ictus. No obstante, un ensayo clínico a corto plazo demostró que los enfermos con cáncer de próstata avanzado tratados con Provenge vivían, por término medio, al menos cuatro meses más que sus homólogos no tratados.

LOS SIGUIENTES PASOS

La aprobación por la FDA de Provenge y los prometedores datos preliminares de ensayos clínicos llevados a cabo por diversas compañías, incluida la nuestra, indican que nos estamos adentrando en una nueva era en el desarrollo de vacunas contra el cáncer. Pero a medida que avanzamos descubrimos que los logros de la inmunoterapia no pueden medirse con los mismos criterios que los de la quimioterapia o la radioterapia. Los dos últimos tratamientos demuestran en poco tiempo su efecto; en el plazo de unas semanas, el tamaño de los tumores se reduce, en caso favorable, o no se modifica, en caso desfavorable. En cambio, tras un tratamiento con una vacuna contra el cáncer, el sistema inmunitario podría tardar hasta un año antes de detener de modo notable el crecimiento del tumor.

Vencer la reticencia del sistema inmunitario a destruir células que han surgido del propio hospedador constituye tal vez el mayor obstáculo en el desarrollo de una vacuna terapéutica eficaz contra el cáncer. Otro resultado inesperado ha sido que los tumores parecen aumentar de tamaño después de un tratamiento con la vacuna. Sin embargo, el análisis del tejido tumoral muestra que ese efecto se debería a las células inmunitarias invasoras, no a la multiplicación de las células del tumor.

El ritmo comedido con el que el sistema inmunitario está respondiendo hasta el momento a las vacunas terapéuticas contra el cáncer permite extraer dos conclusiones intermedias importantes. En primer lugar, a corto plazo, las vacunas individuales probablemente resultarán más eficaces en las primeras etapas de la enfermedad, cuando los tumores aún no alcanzan el tamaño suficiente para deprimir el sistema inmunitario del paciente y este todavía puede esperar a que se produzca una respuesta inmunitaria fuerte. En segundo lugar, las personas con cáncer avanzado seguramente deberán someterse a los tratamientos habituales para reducir el tamaño de los tumores, antes de que puedan beneficiarse de los efectos de una vacuna. Su eficacia aumentará si se parte de tumores pequeños y nuevos, o que estén disminuyendo de tamaño, porque los grandes y de larga duración suprimen o evaden mejor al sistema inmunitario, en comparación con los primeros. Presentan más células que liberan una mayor cantidad y variedad de sustancias inmunodepresoras. En las últimas etapas de la enfermedad, la cantidad de tumores resulta excesiva como para que incluso un sistema inmunitario sano pueda luchar contra ellos.

A pesar de esos obstáculos, los resultados son claros: se puede estimular el sistema inmunitario de un paciente para ayudarlo a combatir el cáncer. Este convencimiento ha proporcionado una enorme esperanza a los investigadores del ámbito académico y de la industria privada, que han perseverado en sus intentos a pesar de cosechar tantos fracasos. Se están reexaminando ensayos clínicos descritos como infructuosos, por si se hubiesen pasado por alto datos relacionados con una respuesta inmunitaria. De hecho, en uno de esos estudios sobre una vacuna contra el cáncer de próstata (Prostvac) se demostró que, a pesar de que el compuesto no había logrado su objetivo principal (impedir el crecimiento tumoral), sí había aumentado la supervivencia global.

Después de años de resultados decepcionantes, nos hemos acostumbrado a mirar más allá de los contratiempos y a no realizar demasiadas promesas. Pero los datos que han aportado la investigación y los ensayos clínicos en el último par de años hacen pensar que, en el próximo decenio, las vacunas terapéuticas contra el cáncer desempeñarán un papel destacado (junto con la cirugía, la quimioterapia y la radioterapia) en el tratamiento de algunos de los tumores malignos más frecuentes que asolan a la humanidad.

PARA SABER MÁS

La función maligna de la inflamación. Gary Stix en *Investigación y Ciencia*, vol. 372, págs. 40-47, septiembre de 2007.

Strategies for cancer vaccine development. Matteo Vergati et al. en *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, vol. 2010. Publicado online en 2010. **www.hindawi.com/journals/jbb/2010/596432**

A new era in anticancer peptide vaccines. Sonia Pérez et al. en *Cancer*, vol. 116, n.º 9, págs. 2071-2080, 1 de mayo de 2010. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20187092**

David Finkleman investiga en el Centro de Estándares Espaciales e Innovación y es miembro del Grupo de Trabajo de Operaciones Espaciales de la Organización Internacional de Normalización. **Steve Allen** trabaja como analista programador del Observatorio Lick de la Universidad de California. **John Seago** es ingeniero astrodinámico en Analytical Graphics. **Rob Seaman** trabaja como ingeniero informático en el Observatorio Nacional de Astronomía Óptica de EE.UU. **Ken Seidelmann** es profesor de astronomía en la Universidad de Virginia y ha sido director de astrometría en el Observatorio Naval de EE.UU.

METROLOGÍA

El futuro del tiempo

El UTC y los segundos intercalares: ¿Seguirán los relojes terrestres marcando la hora solar?

David Finkleman, Steve Allen, John H. Seago, Rob Seaman y P. Kenneth Seidelmann

«Desde eras inmemoriales, el movimiento aparente de los astros ha dictado el paso del tiempo. Cualquier sistema de medición, ya sean las horas del día y de la noche o los intervalos más largos que componen el calendario y la cronología, depende todavía de los movimientos celestes. Los demás instrumentos, como los relojes, no son sino meros auxiliares o intermediarios.»

Los astrónomos estadounidenses Edgar Woolard y Gerald Clemence suscribían tales afirmaciones en 1966. No hace tanto, si atendemos a la historia de la medición del tiempo. Sin embargo, lo que por entonces parecía obvio (la necesidad de vincular el tiempo civil al movimiento de los astros) puede que se abandone dentro de poco. El próximo mes de enero, el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) de las Naciones Unidas quizá decida deshacerse para siempre de ese vínculo.

Más conocido por las siglas UTC, el Tiempo Universal Coordinado es el sucesor moderno del Tiempo Medio de Greenwich (GMT). Raíz de la medición oficial del tiempo en casi todo el mundo, el UTC queda determinado por un cómputo continuo de *segundos SI*, la unidad fundamental de tiempo según el Sistema Internacional de Unidades. El segundo SI se define como la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación emitida por la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133, un fenómeno físico independiente de la rotación de la Tierra [*véase* «Revisión del Sistema Internacional de Unidades», por R. Wynands y E. O. Göbel; Investigación y Ciencia, julio de 2010].

Antes de que naciese la definición moderna del segundo, los relojes se acomodaban al movimiento de los astros. A partir de 1972, sin embargo, las señales de radiodifusión que fijan la hora comenzaron a sincronizarse con respecto a los segundos atómicos. Desde entonces, a fin de mantener esas señales acompasadas con la rotación real de la Tierra, se vienen añadiendo de manera ocasional segundos intercalares al cómputo de segundos atómicos. Ese ajuste compensa las ligeras irregularidades de la rotación terrestre, mucho menos uniforme que el ritmo cuántico del cesio 133.

Aunque los segundos intercalares han servido para reconciliar dos nociones de tiempo muy diferentes, la propuesta del UIT-R quizá acabe para siempre con ellos. En tal caso, todos los relojes que le son familiares (de pulsera, de pared o el de su ordenador) empezarán a desviarse del tiempo celeste, algo que comportaría consecuencias científicas, técnicas, legales, filosóficas y sociales: desde abandonar la necesidad de preservar el co-

EN SÍNTESIS

La noción tradicional del segundo es astronómica: la fracción 1/86.400 de una rotación terrestre (un día). Sin embargo, el Sistema Internacional moderno define el segundo a partir de cierta resonancia atómica del átomo de cesio, independiente de toda consideración celeste.

La duración real de una rotación de la Tierra no son 86.400 segundos atómicos. Por ello, cada dos o tres años es necesario añadir un segundo intercalar («bisiesto») al Tiempo Universal Coordinado. Ello ocasiona algunos inconvenientes técnicos en equipos informáticos y de telecomunicaciones.

El próximo mes de enero se debatirá en Ginebra la posibilidad de abolir los segundos intercalares. En tal caso, el tiempo civil perdería por primera vez en la historia su vínculo con el movimiento de los astros. Si bien con lentitud, el desfase entre ambos iría aumentando a lo largo de los años.

La obra *Festejo electoral,* **del pintor satírico William Hogarth, ilustra un banquete del Whig (antiguo Partido Liberal británico). Uno de los asistentes pisa una bandera (*inserto*) en la que se lee: «Dadnos nuestros once días». El pintor reflejaba así la protesta inglesa contra el adelanto de once días introducido por la reforma gregoriana de 1752. Durante milenios, la humanidad ha ensayado toda suerte de artificios para mantener calendarios y relojes en armonía con los astros.**

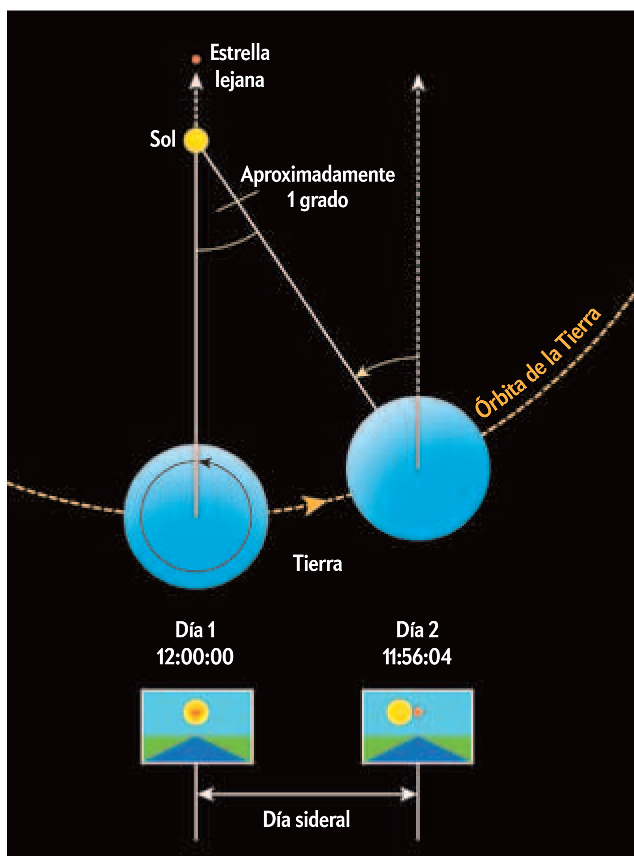


CORTESÍA DEL MUSEO SIR JOHN SOANE

nocimiento cronométrico de la rotación de la Tierra, hasta que la palabra *día*, en lugar de significar «una rotación terrestre», pasaría a denotar «794.243.384.928.000 ciclos de la radiación emitida por la transición hiperfina del átomo de cesio 133». Quienes nos dedicamos a la astronáutica, la navegación espacial y la astronomía deseamos llamar la atención sobre esta situación insólita.

EL CALENDARIO Y LOS DÍAS

Llamamos calendario a un sistema que señala la sucesión de los días durante períodos prolongados y que guarda relación con los ciclos lunar y solar. La duración media de un día solar (el que determina la rotación de la Tierra sobre su eje) no es un divisor exacto ni de los períodos orbitales de la Luna en torno a la Tierra, ni de los de esta alrededor del Sol. Por tanto, si el calendario no se viese sujeto a ajustes periódicos, las estaciones se irían desplazando a lo largo del año. La necesidad de intercalar años bisiestos cada cierto tiempo se conoce desde la antigüedad. A pesar de lo rudimentario de sus sistemas de medición, numerosas culturas pasadas dedujeron que 365,25 rotaciones de la Tierra sobre su eje equivalían a una órbita del planeta alrededor del Sol. Julio César estableció así, ya en el año 45 a.C., un calendario que añadía un día cada cuatro años.



Cuando se mide la duración de una rotación de la Tierra, el tiempo solar aparente varía, ya que la órbita del planeta alrededor del Sol influye en el tiempo que transcurre entre dos apariciones consecutivas del Sol sobre un mismo punto de la Tierra. El tiempo sideral es más uniforme, ya que el movimiento relativo de la Tierra con respecto a las estrellas lejanas («fijas») resulta menor. El día solar medio se calcula como el día sideral ajustado a la órbita anual de la Tierra.



Hoy sabemos que la aproximación de 365,25 días por año tampoco es perfecta: adolece de un exceso del 0,002 por ciento. En el siglo XVI, el desfase acumulado desde los tiempos de Julio César había ascendido a 10 días, por lo que el papa Gregorio XIII decidió abordar el problema. Ordenó que el viernes 15 de octubre de 1582 se convirtiese en el día siguiente al jueves 4 de octubre. Para ajustarse al equinoccio y a la Pascua, el nuevo calendario gregoriano suprimía tres días intercalares julianos cada cuatro siglos.

Diferentes países y religiones adoptaron sus propias medidas. En 1712, Suecia añadió un 30 de febrero a su calendario nacional. Gran Bretaña y sus colonias se resistieron durante dos siglos a la reforma gregoriana. Aunque George Washington nació el 11 de febrero de 1731 del antiguo calendario, EE.UU. lo celebra el 22 de febrero, puesto que la diferencia de 11 días se corrigió durante la vida del mandatario. Puede que quepa discutir la fecha de nacimiento de George Washington según el calendario, pero no el instante astronómico de su nacimiento.

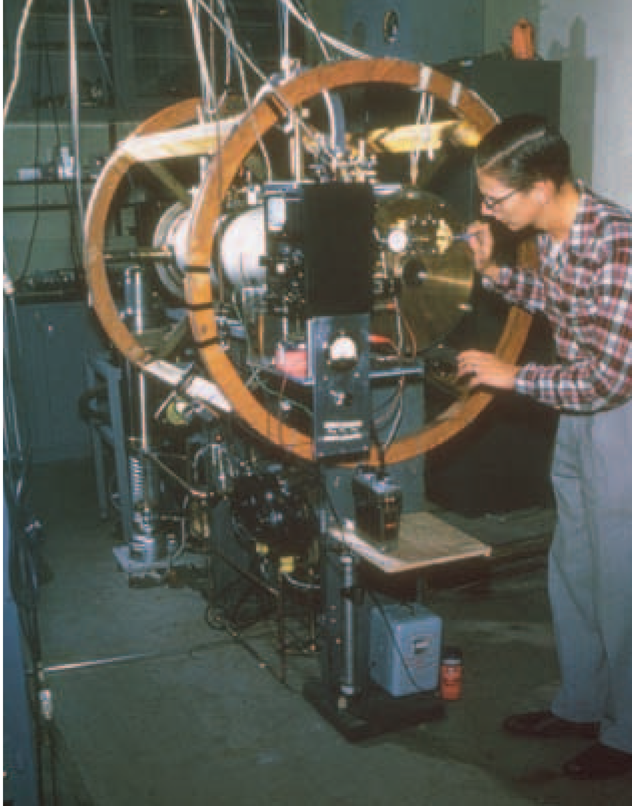
El calendario gregoriano se emplea en todo el mundo con fines oficiales. Ciertas religiones y tradiciones nacionales se rigen por un calendario lunar con años de 354 días (doce lunaciones), por lo que el día de año nuevo se va desplazando a lo largo de las estaciones. Otros calendarios lunares preservan la correlación con las estaciones gracias a la adición de un mes intercalar cada pocos años (que, por tanto, cuentan con trece lunaciones). Las culturas que aún conservan sus calendarios religiosos (lunares o lunisolares) para usos civiles necesitan establecer concordancias con el calendario gregoriano a fin de poder mantener relaciones comerciales. El calendario chino es lunisolar: combina los ciclos de la Luna y el Sol, y emplea una tabla de conversión para situar sobre el calendario solar las fechas correspondientes [*véase* «El calendario chino», por J.-C. Martzoff; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010].

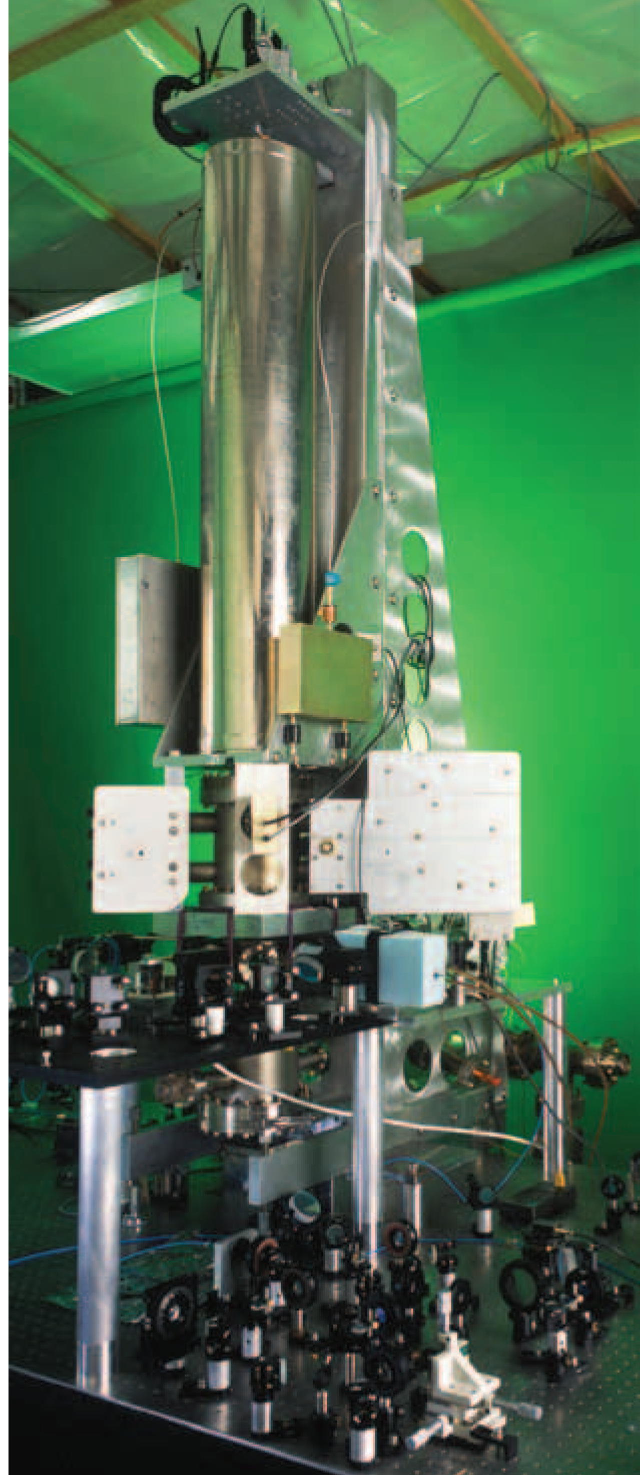
La interpretación correcta de cualquier suceso histórico exige entender tanto el calendario vigente en la actualidad como el que regía en el momento y lugar del evento. Para programar en un ordenador tales conversiones, se requiere una base de datos que recoja las reglas y la información relativas a diferentes tiempos y lugares, así como ciertas particularidades, como el horario de verano allí donde se adopta. Los ajustes intercalares resultan inevitables: siempre se han efectuado y deberán mantenerse a lo largo de la historia.

El *segundo intercalar* responde al mismo tipo de requerimientos. La precisión que exige la técnica moderna obliga a tener en cuenta las ínfimas discrepancias entre el tiempo transcurrido durante una rotación terrestre y los 86.400 segundos (24 × 60 × 60) que marca un reloj atómico. De hecho, la enorme precisión de

Analema: La posición del Sol en el firmamento según se observa a la misma hora y en el mismo lugar durante todo el año describe una curva con forma de ocho, el *analema*. Su silueta se debe a la órbita elíptica de la Tierra y a la inclinación de su eje. Dennis di Cicco, de la revista *Sky & Telescope*, fue el primero en fotografiar el analema. Entre febrero de 1978 y febrero de 1979, superpuso en un mismo fotograma 45 exposiciones: 44 del Sol y una adicional para iluminar el entorno cuando el Sol se encontraba al oeste, fuera del campo de visión de la cámara. Las líneas rectas se deben a una exposición continua de la trayectoria del Sol desde el horizonte hasta su ascensión máxima en el solsticio de verano (*izquierda*), el de invierno (*derecha*) y en el día en el que las trayectorias se cruzan (*centro*).

AMERICAN SCIENTIST (*ilustración*), DENNIS DI CICCO (*analema*)





El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. (NIST) obtuvo en 1952 la primera medida exacta de la frecuencia de resonancia del cesio gracias al instrumento NBS-1 (*arriba*). En la actualidad, el patrón de tiempo civil en EE.UU lo proporciona el NIST-F1 (*derecha*). Su error en la medición de segundos SI se calcula en un segundo cada 100 millones de años.

la que gozan los patrones atómicos acentúa aún más tales desviaciones. Así como los calendarios requieren ajustes periódicos, también los relojes necesitan segundos intercalares.

EL RELOJ Y LOS SEGUNDOS

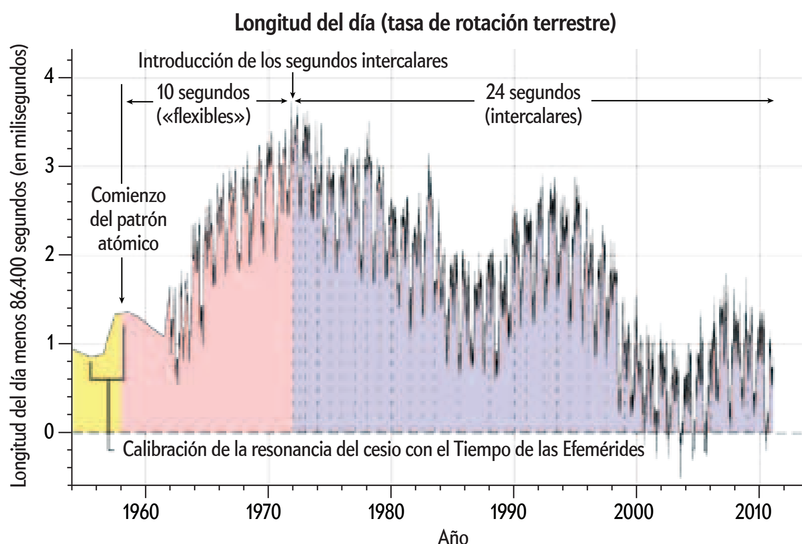
Si bien los calendarios llevan la cuenta de los días, los relojes los desmenuzan. Para fragmentar el día en unidades menores, la humanidad ha empleado corrientes de agua y arena, péndulos, la vibración de cristales y las transiciones atómicas. El concepto de hora proviene del antiguo Egipto, donde tanto el día como la noche contaban siempre con 12 horas (aunque su duración hubiese de cambiar a lo largo del año). La división de la hora en sesenta unidades —un número que se presta con facilidad a las subdivisiones— proviene de las fracciones sexagesimales babilónicas. El sistema más antiguo y generalizado prescribe un día de 24 horas, una hora de 60 minutos y un minuto de 60 segundos. Así, el segundo se obtiene como la fracción 1/86.400 del día.

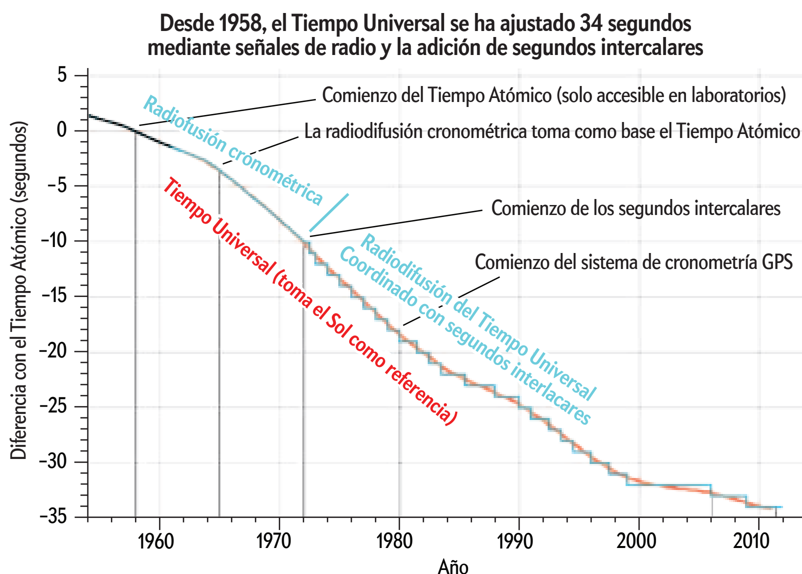
Existen, sin embargo, varios tipos de días astronómicos. Al igual que el día puede definirse con respecto al movimiento aparente del Sol, lo mismo puede hacerse con respecto a las estrellas fijas. El *día solar aparente* denota el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano. Para medirlo, basta con un reloj solar. El día así definido no es uniforme: varía unos 30 minutos al cabo del año. Por otro lado, el *día sideral* se define de manera análoga pero con respecto a estrellas distantes. Goza de mayor uniformidad, ya que no sufre las irregularidades que, en el primer caso, introduce la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

El día solar aparente es, de media, unos cuatro minutos más largo que el día sideral. Se llega así a la definición de *tiempo solar medio*, el más adecuado para la medición con relojes y el que, en promedio, refleja con mayor fidelidad el movimiento orbital de la Tierra en torno al Sol. De un día a otro pueden notarse variaciones en todos los movimientos astronómicos; estos, sin embargo, tienden a compensarse al cabo de un año. La mejor ilustración del fenómeno nos la proporciona el analema, la curva que describe en el cielo la posición del Sol cuando lo observamos a la misma hora y desde el mismo lugar durante todos los días del año. Su trazado en forma de ocho se debe a la excentricidad de la órbita terrestre y a la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto a la eclíptica.

A finales del siglo XIX, Simon Newcomb dirigía la Oficina del Almanaque Náutico de EE.UU., el organismo encargado de publicar los datos siderales que necesitaban navegantes, agrimensores y astrónomos. Gracias a las observaciones del Sol y los pla-

CORTESÍA DE NIST, GEOFFREY WHEELER (*NIST-F1*)





La rotación de la Tierra no goza de la misma uniformidad que la resonancia de los átomos de cesio. El gráfico superior refleja la evolución de dicha variación en términos de la diferencia entre la duración real de una rotación completa y 86.400 segundos SI. Pese a que la rotación terrestre tiende a hacerse más lenta con el paso de los siglos, algunos decenios pueden experimentar pequeñas variaciones de otro tipo. La gráfica inferior representa la transición, en 1972, del Tiempo Universal al Tiempo Universal Coordinado. Desde entonces, han sido necesarios 24 segundos intercalares para sincronizar el Tiempo Atómico con las rotaciones reales de la Tierra. La cronometría del sistema GPS, que no añade segundos intercalares, se encuentra adelantada 15 segundos con respecto al UTC.

AMERICAN SCIENTIST, SEGÚN S. ALLEN

netas registradas desde 1750, determinó con una precisión insólita la duración del día solar medio, y tomó ese tiempo solar medio como variable independiente en las ecuaciones que utilizó para calcular los movimientos relativos del Sol y los planetas. Newcomb sospechaba que la rotación de la Tierra sufría ligeras irregularidades, ya que las posiciones lunares que él tabulaba no podían predecirse con total certeza a partir del tiempo solar medio. Newcomb promedió más de 150 años de dichas variaciones para ajustar su definición, la cual fue adoptada después como patrón internacional.

Hacia 1930 se confirmó que la variable independiente que Newcomb había denominado «tiempo» no guardaba una correlación exacta con el tiempo calculado a partir de la rotación de la Tierra, ligeramente irregular. Así, ambos conceptos se separaron: la medición astronómica directa de la rotación de la Tierra, conocida antaño como «tiempo solar medio en Greenwich», pasó a denominarse Tiempo Universal (UT); la variable independiente de Newcomb fue bautizada como Tiempo de las Efemérides. En cualquier época futura, la diferencia entre la posición observada de la Luna o un planeta y la que predicen las tablas de Newcomb podría servir para deducir la diferencia entre el Tiempo de las Efemérides y el Tiempo Universal. Gerald Clemence, empleado en la Oficina del Almanaque Náutico decenios después de Newcomb, declaró en 1948 que el Tiempo de las Efemérides solo pretendía ayudar a los astrónomos y otros científicos, por lo que era lógico «continuar empleando el tiempo solar medio [Tiempo Universal] para fines civiles».

En torno a 1960, el *segundo de las efemérides* (en teoría, uniforme) se había adoptado como la unidad fundamental de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades. La constancia de esta unidad se ajustaba mejor a tareas como el estudio del sistema solar y la calibración de frecuencias electromagnéticas. Sin embargo, determinar con precisión la relación entre el Tiempo de las Efemérides y el Tiempo Universal a partir de observaciones celestes se antojaba una tarea lenta y fatigosa. Por entonces, los resonadores atómicos ya permitían medir intervalos de tiempo con gran precisión. En 1958, Louis Essen, del Laboratorio Físico Nacional de Inglaterra, y William Markowitz, del Observatorio Naval de EE.UU., determinaron la frecuencia de las radiaciones emitidas por las transiciones hiperfinas de los átomos de cesio 133 que mejor se adaptaba a la duración del segundo de las efemérides y, en 1968, la definición oficial del segundo SI pasó a fundamentarse en las transiciones atómicas. Algunos años después, las mediciones de segundos atómicos que coordinaba la Oficina Internacional de Pesos y Medidas sirvió para definir su propio patrón, el Tiempo Atómico Internacional (TAI).

EL UTC Y LOS SEGUNDOS INTERCALARES

Numerosas aplicaciones científicas y técnicas se apoyan en la inmutabilidad de los segundos SI atómicos. Un día solar jamás ha tenido 86.400 segundos SI. Aunque la diferencia apenas asciende a unos milisegundos al día, el cómputo de segundos atómicos conduce a una hora perceptiblemente distinta de la obtenida mediante los segundos solares medios del Tiempo Universal. Numerosos reglamentos, disposiciones y expectativas sociales y técnicas en todo el mundo requieren que el tiempo civil coincida con el Tiempo Universal. Para calcular posicio-

nes sobre la Tierra, por ejemplo, la navegación astronómica necesita medir el Tiempo Universal con un margen de error inferior a 0,2 segundos. Para localizar un astro o un satélite, los relojes deben seguir con precisión la orientación de nuestro planeta en función del Tiempo Universal.

Durante los años sesenta, las señales de radio conseguían ajustarse al Tiempo Universal gracias a la introducción de escalones temporales inferiores a 0,1 segundos, los cuales variaban la duración de los segundos radiotransmitidos con respecto al patrón atómico. Esta práctica, sin embargo, dificultaba la recuperación exacta de los intervalos de tiempo o la calibración de las frecuencias electromagnéticas a partir de aquellas transmisiones, puesto que la longitud aparente de un segundo radiotransmitido difería de los patrones de frecuencia fundamentales.

Por todo lo anterior, en 1972 se introdujeron los segundos intercalares en el Tiempo Universal. El concepto de UTC fue refinado en 1970 y 1973 por las comisiones de la Unión Astronómica Internacional. La descripción normativa oficial del UTC se debe al Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones, precursor del UIT-R. Desde entonces, los ajustes impuestos al UTC han sido ocasionales. La adición de segundos intercalares preserva la relación entre los segundos atómicos y el UT1, la versión del Tiempo Universal que de manera más fiel refleja la orientación instantánea de la Tierra.

Los segundos intercalares se añaden en un mismo instante en todo el mundo. Debido a los husos horarios, se introducen una hora (local) antes en cada huso al oeste de Greenwich, y una hora después en cada huso hacia el este. Hasta la fecha, se han introducido 24 segundos intercalares. El UTC puede hoy obtenerse con diversos niveles de fidelidad a través de numerosos medios; entre ellos, las señales de radio, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), las transmisiones de los satélites de comunicaciones y meteorológicos, o los protocolos de sincronización de Internet.

Cuando se estableció el UTC, las emisiones de radio en onda corta constituían el medio principal para la transmisión de señales de sincronización en tiempo real. Por ello, el Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R) se responsabilizó de mantener las directrices de transmisión del UTC, si bien no participaba en el perfeccionamiento de la escala de tiempos. La UIT es un organismo administrativo regulador de las Naciones Unidas, por lo que carece de la autoridad (y de los medios) para asegurar que la escala del Tiempo Universal Coordinado se genere, distribuya y utilice de manera correcta. En realidad, ninguna organización regula tales asuntos. Sin embargo, las recomendaciones de la UIT ejercen una enorme influencia sobre los Gobiernos.

La Oficina Internacional de Pesos y Medidas se encarga de mantener la secuencia de segundos atómicos. La necesidad de introducir segundos intercalares la determina el Servicio Internacional para la Rotación Terrestre y los Sistemas de Referencia (IERS, por sus siglas en inglés). A partir de mediciones de gran precisión sobre la rotación de la Tierra con respecto a fuentes de radio cósmicas, prescribe intercalar un segundo cuando la diferencia entre el UTC y el UT1 se aproxima o sobrepasa los 0,5 segundos. Por lo general, avisa con seis meses de antelación y, por convenio, el segundo intercalar se añade tras el último segundo del último día de un mes (hasta ahora, junio o diciembre). El segundo añadido se asigna a las 23:59:60, lo que prolonga la duración de un día UTC a la vez que mantiene un cómputo del tiempo continuo e inequívoco.



AMERICAN SCIENTIST

Minutos de 61 segundos: La adición de segundos intercalares no siempre ha resultado fácil. Por ejemplo, no puede implementarse en relojes analógicos, si bien dichos instrumentos no suelen exigir semejante grado de precisión. No todos los usuarios de relojes digitales conocen la diferencia o poseen los medios para mantenerse sincronizados con el Tiempo Universal Coordinado.

EN LA ENCRUCIJADA

La mayoría de las personas desconocen en qué consiste y de dónde procede el UTC. Ni siquiera los informáticos y los fabricantes de componentes electrónicos se hallan siempre al tanto de las prescripciones para añadir segundos intercalares. En ocasiones se conoce su existencia, pero no se toma en consideración. Esas omisiones no suelen afectar al diseño de programas y equipos, puesto que muy pocas aplicaciones requieren una sincronización con respecto al UTC o exigen indicar el huso horario con una precisión de segundos. Los ordenadores, en particular, no son relojes de precisión: sus osciladores internos pueden llegar a desviarse varios minutos al día. La mayoría están programados para sincronizarse regularmente con algún generador exacto de tiempos. Los dispositivos conectados en red renuncian con frecuencia a insertar segundos intercalares; señalan una hora incorrecta hasta que el reloj del sistema se reajusta por medio de un servicio externo. Puede que la existencia de segundos intercalares resulte irrelevante para todas esas aplicaciones, pero en ningún caso las deteriora.

Sin embargo, los segundos intercalares causan problemas en los sistemas que sí exigen una sincronización exacta, pero cuyo diseño no permite incorporar minutos con un segundo adicional. Para quienes comparten datos entre varios sistemas puede resultar problemático que algunos dispositivos ignoren los segundos intercalares, ya que comprometería la precisión de la secuencia de datos.

Esa clase de inconvenientes se debe, en parte, al sistema de notificaciones. Los anuncios de segundos intercalares se publican en el Boletín C del IERS, muy al estilo de las comunicaciones diplomáticas del siglo XIX, por lo que alguien debe convertir esa información en algún formato con el que los ordenadores puedan operar. El sistema GPS tal vez suponga el medio más fiable y adecuado para ser informado de modo automático sobre la introducción de segundos intercalares: envía un aviso electrónico poco después del anuncio oficial, emitido con unos seis meses de antelación. Sin embargo, la hora que proporciona el sistema GPS no incluye esos segundos, por lo que hoy en día se encuentra adelantada 15 segundos con respecto al UTC. El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. difunde por radio las notificaciones con una antelación de hasta 30 días. Algunos protocolos de interconexión en red solo permiten anticiparse alrededor de un minuto, un tiempo muy corto para algunas aplicaciones. En sitios donde la actualización no está automatizada, el aviso puede llegar demasiado pronto o demasiado tarde.

Los relojes analógicos no pueden incorporar minutos de 61 segundos, pero los digitales sí. Resultaría aún más fácil intercalar un «segundo negativo» (si tras las 23:59:58 de un día se pasase a las 00:00:00 del día siguiente), pero todavía no se ha presentado tal caso. La carencia de equipos digitales asequibles que admitan minutos con un segundo extra (el formato 23:59:60) ha propiciado la aparición de representaciones poco convencionales del UTC y de los husos horarios que, además, podrían causar problemas a la hora de sincronizar relojes entre ordenadores.

Cuando por primera vez se introdujeron los segundos intercalares en el UTC, las ventajas para la industria de telecomunicaciones resultaron enormes. Pasada una generación, sin embargo, el entusiasmo disminuyó. En 2001, el UIT-R resolvió estudiar la cuestión de los segundos intercalares. Una comisión recomendó su abolición, aunque aconsejaba conservar el nombre «Tiempo Universal Coordinado» y las siglas UTC.

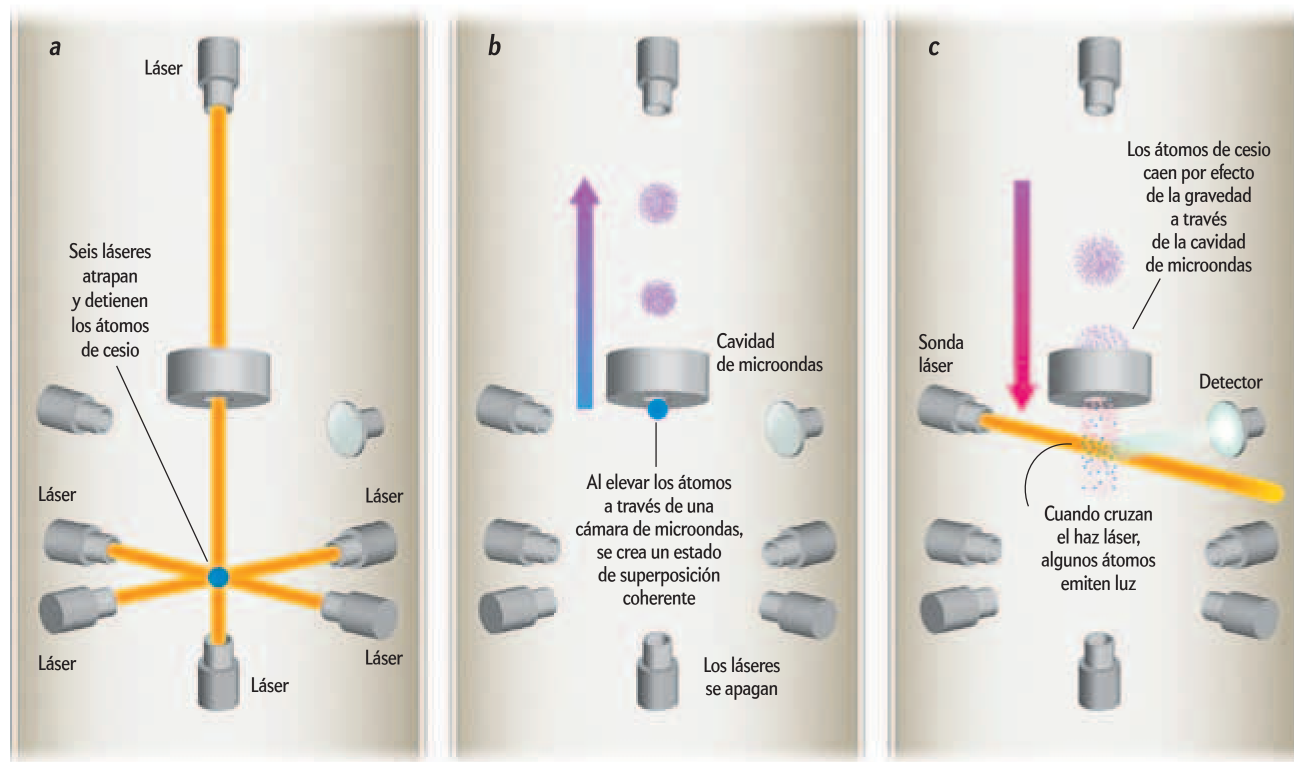
En la mayoría de los países, el UTC constituye la base de la medición del tiempo civil. Se trata de un convenio que no debe modificarse a capricho. Las disposiciones oficiales relativas a la medición del tiempo no siempre se anticiparon a los cambios en el UTC ni lo definieron con excesivo detalle. En su reunión en Ginebra durante el próximo mes de enero, el Sector de Radiocomunicaciones del UIT-R votará la recomendación. En caso de ser aprobada, suprimirá los segundos intercalares para 2018. A partir de entonces, el Tiempo Universal Coordinado (UTC) dejaría de estar coordinado con el Tiempo Universal (UT1).

¿CAERÁ EL CIELO?

No hay calendario que perdure para siempre. La historia nos ha enseñado que, antes o después, cualquier sistema de medición del tiempo acaba siendo sustituido por otro. Incluso el calendario gregoriano requerirá en algún momento nuevos ajustes de días intercalares, puesto que sus reglas no representan más que una aproximación a las verdaderas relaciones astronómicas.

De igual manera, el UTC tampoco regirá dentro de mil años, pues se necesitarán más segundos intercalares por año que meses en los que estos puedan añadirse. Ello se debe a que, con el paso de los milenios, los días se van alargando. Aunque durante los últimos años la duración del día medio ha disminuido, a largo plazo se espera que el día astronómico se alargue en unos pocos milisegundos cada siglo como consecuencia de las fuerzas de marea que la Luna ejerce sobre nuestro planeta. Hoy, la razón para intercalar segundos se debe a que la longitud del día se aproxima a 86.400,001 segundos SI, por lo que necesitamos alrededor de un segundo intercalar cada dos o tres años (mil días). Sin embargo, se calcula que dentro de 50.000 años el día astronómico durará 86.401 segundos SI, lo que obligaría a introducir un segundo intercalar diario, a menos que la medición del tiempo haya cambiado para entonces.

Resulta interesante imaginar cómo se adaptará el mundo a esa situación futura. Los relojes aportan tanta información sobre la humanidad como cualquier otro ingenio producto de la técnica. Pero lo cierto es que la medición del tiempo nos ocupa aquí y ahora, y continuará resultando esencial para la sociedad



AMERICAN SCIENTIST CON INFORMACIÓN DEL NIST

Así funciona: El instrumento NIST-F1 proporciona el patrón de frecuencia de alta precisión empleado actualmente por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU. para calibrar los segundos atómicos. En primer lugar, se introduce cesio gaseoso en una cámara de vacío. Seis láseres infrarrojos frenan los átomos de cesio y los agrupan en una bola (*a*). Después, dos láseres verticales la elevan un metro a través de una cavidad de microondas. Ese desplazamiento altera el estado de algunos de los átomos (*b*). Cuando la bola desciende de nuevo, una sonda láser ilumina los átomos; los que habían modificado su estado al atravesar la cavidad de microondas emiten luz (*c*). La frecuencia de microondas que produce la máxima fluorescencia coincide con la resonancia natural del átomo de cesio empleada para definir el segundo.



El patrón atómico del UTC viene dado por el Tiempo Atómico Internacional (TAI). Este se basa en mediciones de resonancia atómica obtenidas por unas 200 estaciones internacionales (*puntos*). La Oficina Internacional de Pesos y Medidas de París mantiene el TAI con los datos que recibe de esos lugares. Cada cierto tiempo, se introducen segundos intercalares en el UTC a fin de que la diferencia (positiva o negativa) entre el Tiempo Atómico y el Tiempo Universal no supere los 0,9 segundos. Esa adición de segundos viene recomendada por el Servicio Internacional para la Rotación Terrestre y los Sistemas de Referencia. La Unión Internacional de Telecomunicaciones, autora de las recomendaciones sobre las señales de radio que transmiten el UTC, considerará el próximo mes de enero la posibilidad de eliminar los segundos intercalares.

durante los siglos venideros. Siempre deberemos distinguir entre el día y la noche, dividir en horas nuestros días laborables y situar en el tiempo los acontecimientos inolvidables. Si la medición del tiempo se separase de los movimientos celestes, no parece fácil aventurar de qué manera podrían volver a unirse ambos conceptos. La abolición de los segundos intercalares acabará con el requisito de que los equipos de cronometría y telecomunicaciones incorporen medios para ajustarse a la adición de segundos, por lo que en el futuro podrían surgir problemas técnicos para acompasar nuestra medida del tiempo con los movimientos de la esfera celeste.

La principal ventaja de suprimir los segundos intercalares reside en prescindir de la sobrecarga logística que requiere su seguimiento y visualización, innecesaria en sistemas cuyo funcionamiento no depende del tiempo astronómico. Ello simplificaría de manera considerable algunos sistemas de telecomunicaciones y de navegación electrónica, aunque perjudicaría a aquellos que trabajan con información cronológica histórica. Además, deberían reprogramarse todos los sistemas informáticos que, hoy por hoy, dan por sentado que UTC y UT1 difieren siempre en menos de un segundo. En ciertas operaciones espaciales y astronómicas habría que distinguir entre UTC sin segundos intercalares y UT1. Asimismo, los países deberían modificar aquellas disposiciones legales que poseen como patrón (explícito o implícito) el tiempo astronómico, además de revisar y actualizar los documentos y estándares relativos a la medición del tiempo y el UTC.

Dado que, sin segundos intercalares, la diferencia entre la hora aparente y la hora del reloj se incrementará, llegará el día en que habrán de introducirse modificaciones mayores que un segundo. Y omitirlas no resultará tan sencillo como es hoy ignorar los segundos intercalares. Ante una ausencia total de ajustes horarios, en un futuro lejano los Gobiernos deberán redefinir de nuevo los husos horarios, y la línea internacional de cambio de fecha deberá trasladarse para evitar que el cambio de fecha se produzca durante las horas diurnas.

No hay consenso entre Gobiernos, instituciones académicas e industrias sobre la mejor decisión inmediata sobre el tiempo civil, el Tiempo Universal Coordinado y los segundos intercalares. Las confusiones que se derivan del UTC —cuando las hay— se manifiestan más en aplicaciones concretas que en lo que deja adivinar su definición. Y, aunque se abolieran los segundos intercalares, siempre habrá que reconciliar el firme avance de los segundos SI con la duración del día astronómico.

¿Se resolverán o no estas cuestiones en la Conferencia de Radiocomunicaciones del UIT-R el próximo mes de enero? Solo el tiempo lo dirá.

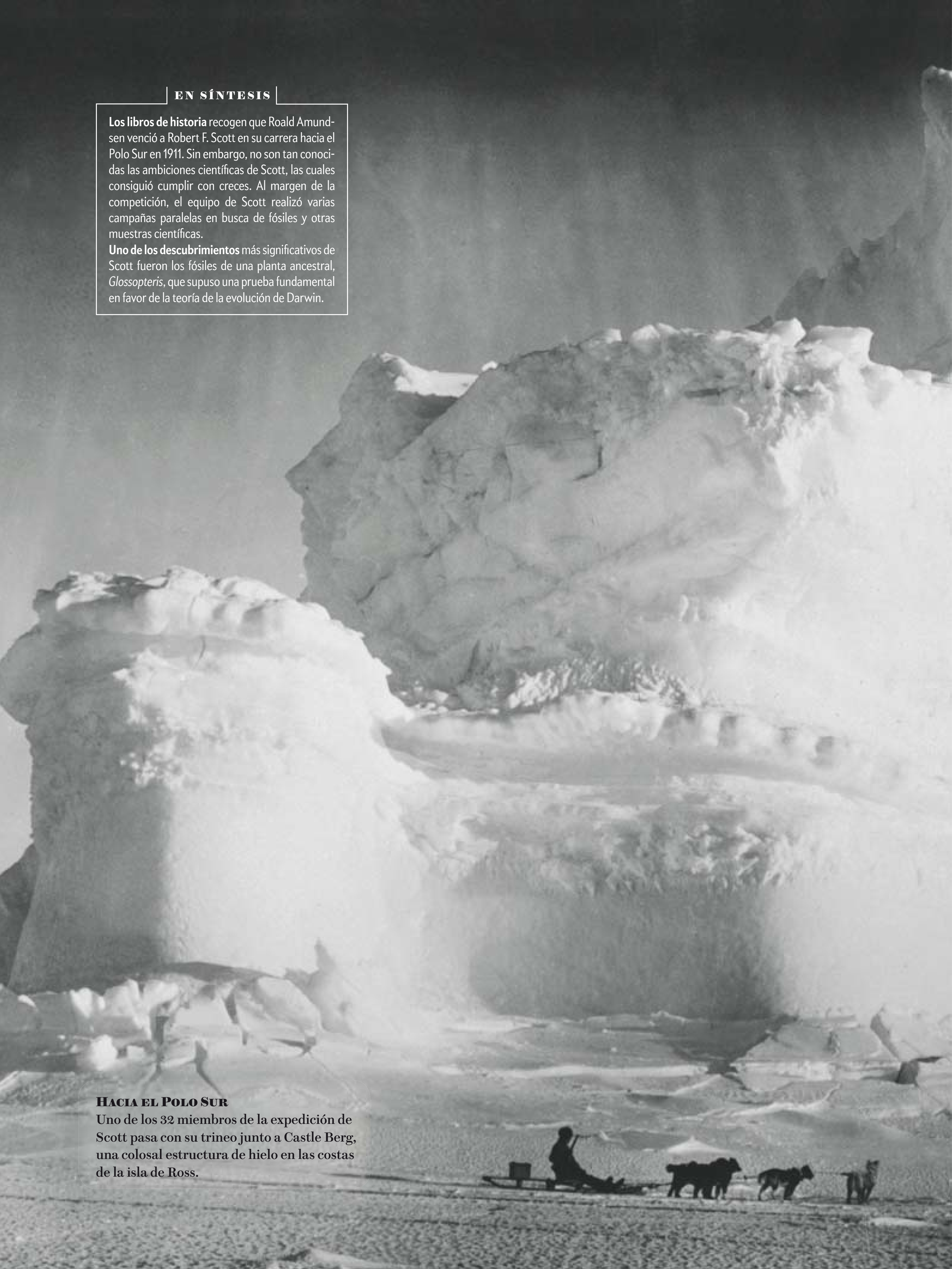
PARA SABER MÁS

On the system of astronomical constants. G. M. Clemence en *Astronomical Journal*, vol. 53, págs. 169-179; 1948.

Explanatory supplement to the astronomic almanac. Dirigido por P. K. Seidelmann. University Science Books. Mill Valley, 1992.

Marking time: The epic quest to invent the perfect calendar. D. Steel. John Wiley & Sons. Hoboken, 2000.

Future of leap seconds. Blog de S. Allen. **www.ucolick.org/~sla/leapsecs**



EN SÍNTESIS

Los libros de historia recogen que Roald Amundsen venció a Robert F. Scott en su carrera hacia el Polo Sur en 1911. Sin embargo, no son tan conocidas las ambiciones científicas de Scott, las cuales consiguió cumplir con creces. Al margen de la competición, el equipo de Scott realizó varias campañas paralelas en busca de fósiles y otras muestras científicas.

Uno de los descubrimientos más significativos de Scott fueron los fósiles de una planta ancestral, *Glossopteris*, que supuso una prueba fundamental en favor de la teoría de la evolución de Darwin.

Hacia el Polo Sur
Uno de los 32 miembros de la expedición de Scott pasa con su trineo junto a Castle Berg, una colosal estructura de hielo en las costas de la isla de Ross.

Edward J. Larson, profesor de historia y derecho en la Universidad de Pepperdine, ha escrito nueve libros sobre historia de la ciencia; entre ellos, el ganador del premio Pulitzer *Summer for the Gods* («Verano para los dioses»; Basic Books, 1997), que analiza el juicio a John Scopes.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Un héroe de mayor gloria

Hace cien años, ante la carrera contra Roald Amundsen por conquistar el Polo Sur, Robert F. Scott se negó a sacrificar su ambicioso programa científico

Edward J. Larson

En junio de 1911, Robert Falcon Scott y otros 32 exploradores (en su mayoría, científicos, oficiales de marina y navegantes británicos) se apiñaban en la oscuridad del invierno antártico, época en la que el sol nunca despunta y cuando una capa de hielo de dos metros y medio flota sobre el mar. En la isla de Ross, la zona sin hielo más austral en la que había atracado el navío de Scott, las temperaturas descienden en invierno hasta los 45 grados Celsius bajo cero y las tormentas de nieve se suceden con frecuencia. Carentes de cualquier sistema de comunicación inalámbrica y aislados por completo del mundo exterior, los exploradores aguardaban la llegada de la primavera. En octubre, algunos de ellos saldrían a recorrer casi 1500 kilómetros de plataforma de hielo y montañas, y surcarían la meseta Antártica hasta alcanzar un punto sin mayor interés que su ubicación en el extremo sur del planeta.

Dos expediciones británicas habían intentado alcanzar con anterioridad el Polo Sur. La primera, entre 1901 y 1904, había sido dirigida por el propio Scott; la segunda, de 1907 a 1909, por Ernest Shackleton. Si bien ninguna de ellas logró su objetivo, en aquella ocasión Scott rebosaba confianza. Basado en su experiencia previa, había diseñado su nueva expedición al milímetro. Y no solo con el fin de ser el primero en llegar al Polo, sino también para cumplir con un ambicioso programa científico. Había coordinado un despliegue de equipos de investigación a lo largo de la bahía de Ross que recolectarían fósiles, datos y todo tipo de material científico. Al llegar la primavera, su equipo se pondría lentamente en rumbo hacia el Polo Sur, para izar allí la bandera del Reino Unido y regresar con la gloria de haber logrado una conquista y una ingente labor científica.

Los largos meses de invierno habían brindado a Scott tiempo de sobra para meditar sobre la decisión que había tomado cuatro meses atrás, antes de que el invierno se cerniera sobre ellos. En febrero, un pequeño equipo de la expedición que intentaba llegar hasta la casi desconocida península de Eduardo VII, al este de la plataforma de Ross, había divisado otro grupo acampado sobre el borde externo de la plataforma, a unos 500 kilómetros de distancia. Eran nueve exploradores noruegos encabezados por Roald Amundsen, un experimentado esquiador de tierras árticas y muy diestro en trineos de perros que, en 1905, había atravesado por primera vez el paso del Noroeste, sobre Canadá. Se suponía que Amundsen se hallaba en una expedición hacia el Polo Norte, a 19.000 kilómetros de distancia; sin embargo, había cambiado en secreto su objetivo hacia el Polo Sur, en lo que Scott vio una estrategia para sorprender a los británicos. Puesto que los hombres de Amundsen no poseían grandes ambiciones científicas, su equipaje era más ligero. Pretendían alcanzar la meta desde una base situada unos 100 kilómetros más cerca del Polo que la de Scott. Lo que para este había comenzado como una marcha premeditada hacia el Polo se convirtió, de imprevisto, en una carrera.

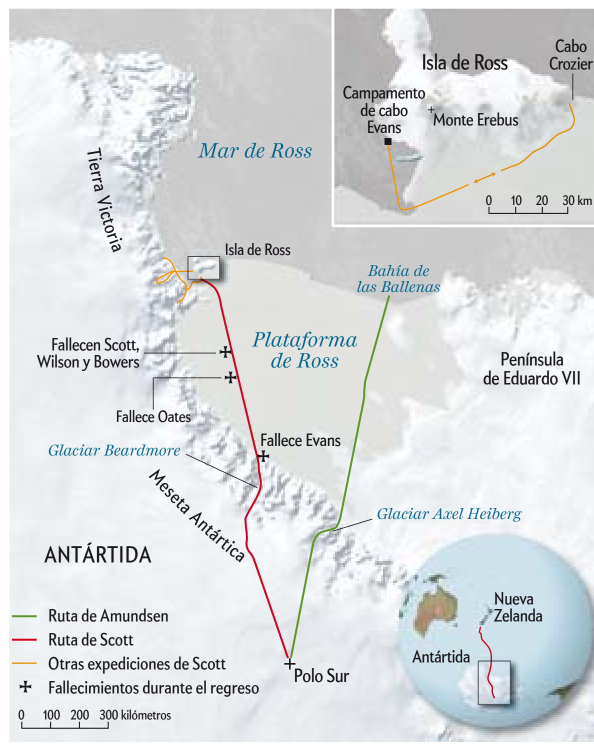
Las noticias causaron una crisis entre sus hombres. Algunos sugirieron abandonar los objetivos científicos y centrarse en la competición. Si había que escoger entre la ciencia y el Polo, preferían lo último. Pero Scott discrepó. Su primera expedición a la Antártida le había dejado un valioso legado de muestras geológicas y biológicas, da-

CORBIS

DOS RUTAS AL POLO

Más que una carrera

La ruta escogida por Robert F. Scott para llegar al Polo Sur (*rojo*) fue distinta de la de Roald Amundsen (*verde*), quien llegó primero. Antes de que Scott partiera del campamento base en cabo Evans, sus hombres pasaron meses realizando campañas geológicas y otras investigaciones en la isla de Ross y sus alrededores, como el cabo Crozier y Tierra Victoria. La importancia que Scott otorgaba a la ciencia era tal que, en su fatal travesía de regreso desde el Polo, él y su equipo (Edgar Evans, Lawrence Oates, H. R. Bowers y Edward A. Wilson) recogieron 16 kilos de fósiles y rocas.



tos meteorológicos y magnéticos, así como descubrimientos oceanográficos y glaciológicos. Consideraba la ciencia una parte esencial de su nueva expedición.

Ante esa competición inesperada, Scott debía elegir entre arriesgarlo todo por el Polo o mantener su agenda investigadora. Optó por persistir: «Lo correcto, así como lo más sensato, es continuar como si nada hubiera ocurrido», escribió en su diario en referencia al desafío del noruego. Dudaba que los perros de trineo de Amundsen pudieran soportar una carrera de centenares de kilómetros en terreno desconocido, pero, en caso de que sí pudieran, carecía de sentido competir con ellos. Desde un punto de vista histórico, hoy debemos agradecerle que no sacrificase las investigaciones, pues su viaje derivó en importantes contribuciones científicas; sin embargo, Scott y su equipo pagarían a un precio muy alto aquella fidelidad.

RODEOS CIENTÍFICOS

Scott era oficial de la Marina Real Británica, una institución con cierta tradición científica. En las tres expediciones británicas a la Antártida efectuadas a comienzos del siglo xx, habían participado físicos, geólogos y biólogos. Por aquel entonces, la teoría de la evolución constituía una de las disciplinas que suscitaban mayor interés. El debate se había centrado en una prueba fósil fundamental: una planta del Paleozoico denominada *Glossopteris*. Los creacionistas habían llamado la atención sobre la repentina aparición de esta planta inconfundible y de grandes hojas en los registros fósiles de África, Australia y Sudamérica. Para rebatirlo, Darwin había postulado la existencia de una masa de tierra cercana al Polo Sur que, de algún modo, habría estado conectada con el resto de los continentes australes y en la que *Glossopteris* habría evolucionado. La primera expedición de Scott encontró vetas de carbón que demostraban que, en el pasado, las plantas habían crecido en la Antártida. La expedición de Shackleton había hallado fósiles de vegetales, pero no de *Glossopteris*. Scott albergaba la esperanza de zanjar la cuestión.

Su viaje había sido diseñado para que varios grupos de apoyo abandonasen la travesía en etapas sucesivas y dejasen a un último equipo, más reducido, que tiraría de un solo trineo y marcharía a pie hasta el Polo. Scott consideraba que esta estrategia permitía un margen de seguridad y, tal vez, la oportunidad de cartografiar o investigar a lo largo del camino. Además, durante su estancia en la Antártida, enviaría a otros grupos de exploradores con el solo propósito de tomar datos científicos. A pesar de que Scott pudo haber congregado a todos esos hombres para que se sumasen a la competición, prefirió no hacerlo. Mientras la expedición se dirigía hacia el Polo, un número de oficiales y científicos permanecerían en el campamento base tomando datos meteorológicos y magnéticos al tiempo que, en el barco, los marineros y científicos a bordo efectuarían investigaciones oceanográficas. Nada de lo anterior se vio alterado por la presencia de Amundsen.

La primera avanzadilla abandonó la base en enero de 1911, ignorante de la presencia del noruego. Scott había enviado diez hombres en dos grupos separados para explorar las montañas y los glaciares. Aun después de que el mayor de los equipos descubriera la base de Amundsen, se le adjudicó una nueva misión científica: estudiar afloramientos, glaciares y bahías a lo largo de la costa norte de Tierra Victoria. Conforme a lo previsto, el equipo pasó allí el invierno de 1911, sin participar en la hazaña polar. Tras pasar inesperadamente un segundo invierno en la zona, el equipo regresaría a la base de Scott en noviembre de 1912 con una colección de fósiles entre los que destacaba una impresionante huella de árbol, pero ninguno de *Glossopteris*.

En febrero y marzo de 1911, el equipo más reducido, del que formaban parte los geólogos T. Griffith Taylor y Frank Debenham, se encargó de explorar los valles secos, los nunataks y los enormes glaciares de la región central de las costas de Tierra Victoria. Después, regresaron al campamento base, donde pasaron todo el invierno, hasta octubre, estudiando sus hallazgos. Si bien contaban con un buen número de fósiles, no había rastro de *Glossopteris*. Taylor y Debenham se embarcaron en otra expedición aún más larga en noviembre, poco después de que Scott ya hubiera partido hacia el Polo. Como apoyo, les acompañaban Tryggve Gran, el mejor esquiador nórdico de Scott, y Robert Forde, un suboficial de la Marina con amplia experiencia en el uso de trineos. La decisión de Scott de asignar a Gran y Forde al grupo científico, en lugar de al suyo propio, demostraba su compromiso con la ciencia. Mereció la pena: Taylor y Debenham pudieron explorar una vasta región de montañas y glaciares hasta entonces desconocidos, donde encontraron un impresionante conjunto de fósiles paleozoicos; aunque, por desgracia, tampoco hallaron *Glossopteris*.

XNR PRODUCTIONS (*mapa*); PÁGINA OPUESTA: INSTITUTO SCOTT DE INVESTIGACIÓN POLAR, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*fotografías*)















Momentos de ciencia
Arriba, de izquierda a derecha: Scott, en su campamento base, escribiendo en su diario; Scott, Bowers, George C. Simpson y Evans en camino para explorar las montañas de Tierra Victoria. *Centro:* Un pingüino emperador; Bowers, Wilson y Apsley Cherry-Garrard preparan la marcha hacia el cabo Crozier para recoger huevos de pingüino emperador; el biólogo Edward W. Nelson examina el equipo para la recogida de especímenes marinos. *Abajo:* Simpson efectúa observaciones en la estación meteorológica de cabo Evans; el geólogo Frank Debenham desmenuza muestras de roca.

EN BUSCA DE LOS PINGÜINOS

El rodeo científico más peliagudo de la misión polar se debió, sin embargo, a una promesa que Scott había hecho a Edward A. Wilson como contrapartida para que este aceptase emprender el viaje. Wilson había prestado una excelente ayuda en calidad de zoólogo en la primera expedición de Scott a la Antártida. En ella habían hallado una colonia de nidificación de pingüinos emperadores en el cabo Crozier, en la isla de Ross, donde Wilson había descubierto que la puesta y eclosión de los huevos de esta ave, considerada ancestral, tenía lugar en invierno. Scott había prometido a Wilson que podría visitar de nuevo la misma colonia para comprobar si los embriones de pingüino emperador mostraban vestigios de dentadura de reptil, ya que Wilson pretendía demostrar que el origen evolutivo de las aves se hallaba en los reptiles.

La visita a la colonia forzó a Wilson, junto con el ayudante Apsley Cherry-Garrard y con H. R. «Birdie» Bowers, uno de los hombres de Scott, a alejarse de la base durante la planificación de la expedición polar, por lo que los científicos se expusieron sin preparación a los peligros de una travesía en trineo en la oscuridad del invierno antártico. Wilson y sus compañeros partieron el 27 de junio de 1911 para recorrer 112 kilómetros a través de la plataforma de hielo de Ross. Arrastraron consigo casi 350 kilos de equipo científico, ropa aislante y provisiones en dos trineos de más de 2,5 metros de longitud, unidos entre sí y a los exploradores mediante arneses.

El equipo rodeó la isla de Ross hacia el sur, donde las temperaturas bajan con frecuencia por debajo de los 55 grados bajo cero. Esas pésimas condiciones les obligaron a reorientar constantemente los trineos, por lo que cada tres kilómetros caminados se traducían en solo uno de avance. Después de tres semanas de arrastre brutal, llegaron a una morrena con vistas al cabo Crozier. Allí construyeron un refugio de piedra con la intención de poder examinar los embriones antes de que los huevos se congelaran. Utilizaron un trineo a modo de viga para construir el techo, extendieron una lona sobre los cuatro muros de piedra, enmasillaron las grietas con nieve y montaron un hornillo de grasa animal para calentar el refugio. Aprovecharon la luz crepuscular del mediodía, que apenas iluminaba durante escasas horas al día, para abrirse paso por un laberinto de grietas glaciares y montículos de hielo descomunales hasta alcanzar la colonia. Llegaron pasado el atardecer. «Teníamos al alcance de la mano un material que podría haber sido de suma importancia para la ciencia. Con cada observación convertíamos teorías en hechos, pero no disponíamos de mucho tiempo», se lamentaba Cherry-Garrard. Tomaron seis huevos y regresaron al refugio, con la intención de volver más tarde a la colonia.

Aquella noche se desató una tempestad devastadora. El viento zarandeó el techo de lona del refugio hasta que, al mediodía de la tercera jornada, este se despedazó y dejó a los exploradores agazapados en sus sacos de dormir bajo una tormenta de nieve. Cuando al día siguiente el temporal amainó, Wilson decidió abandonar. «Debemos aceptar nuestra derrota ante la oscuridad y las inclemencias del cabo Crozier», escribió. Los escasos huevos que habían recogido se perdieron o se congelaron.

Durante el regreso, los hombres se hallaban exhaustos. La temperatura había descendido de nuevo hasta los 55 grados bajo cero y sus sacos de dormir no aislaban bien. Por la noche apenas podían dormir. Bowers y Cherry-Garrard se encontraban tan cansados que se quedaban dormidos sobre los trineos. En una ocasión, Bowers cayó en una grieta profunda y quedó colgado del arnés de su trineo hasta que llegaron a rescatarlo. Las mandíbulas de Cherry-Garrard tiritaban tanto que sus dientes quedaron destrozados. Al llegar al campamento base en agosto, cada mochila de 8 kilos había acumulado hasta 12 kilos de hielo debido a la congelación del sudor y la nieve fundida. Scott los describió así: «Jamás había visto personas tan castigadas por las inclemencias del tiempo. Sus caras se hallaban plagadas de heridas y arrugas, sus ojos habían perdido el brillo y sus manos estaban blancas y arrugadas, debido a la constante exposición a la humedad y el frío».

Bowers se recuperó pronto y se reincorporó a las campañas. En septiembre de 1911 realizó el último viaje previo a la expedición polar. Él y Edgar Evans acompañaron a Scott durante dos semanas en una marcha de unos 280 kilómetros para comprobar la posición de unas estacas colocadas por otro equipo y, así, estudiar el movimiento de los glaciares. La travesía por las montañas fue agotadora. Debían recorrer una distancia de 56 kilómetros cada 24 horas tirando de un trineo a 40 grados bajo cero. «No entendemos muy bien por qué van», se preguntaba Debenham. La razón era la ciencia. Antes, Scott había escrito en su diario: «La situación se antoja realmente satisfactoria en todos los aspectos. Si la travesía [hacia el Polo] tiene éxito, entonces nada, ni siquiera la prioridad en la llegada, impedirá que la expedición sea considerada como una de las más importantes que jamás se hayan realizado en regiones polares». Así sería, gracias a sus investigaciones.

EN MARCHA HACIA EL SUR

Debido al mal tiempo y a algunas demoras causadas por las campañas paralelas, el inicio del viaje polar de Scott fue aplazado. La expedición partió finalmente el 1 de noviembre de 1911, 12 días después que la de Amundsen.

Poco antes de marchar, Scott había escrito: «No sé qué pensar sobre las posibilidades de Amundsen. Desde el principio, he decidido actuar exactamente igual que si no existiera. Cualquier intento de competir podría haber entorpecido mi plan». Scott había apostado por la seguridad antes que por la rapidez. Contaba con varios grupos de apoyo; uno con tractores, que arrastraría los trineos por la plataforma de hielo inicial, y otros con perros y ponis, capaces de alcanzar e incluso ascender por las montañas del glaciar Beardmore. Cada equipo dejaría depósitos de provisiones por el camino, de cara al regreso. Después, se dividirían hasta que quedara solo un grupo, que tiraría de un trineo sobre la meseta Antártica, a casi 3 kilómetros de altura, hasta alcanzar la meta. Esa manera de proceder resultaba pesada y torpe, ya que la expedición tenía que adaptarse a la velocidad del equipo más lento, el de los ponis. Estos caminaban con nieve hasta las grupas, necesitaban forraje y una protección especial contra el viento durante los descansos.

El último grupo de apoyo abandonó la llanura el 3 de enero de 1912. En el equipo final quedaron Scott, Wilson, Bowers, Evans y el capitán del Ejército Británico Lawrence «Titus» Oates. Se enfrentaban a 240 kilómetros de hielo que no ofrecían mayor interés científico que el de tomar medidas meteorológicas y contemplar la superficie barrida por el viento.

Mientras tanto, Amundsen y sus hombres avanzaban con rapidez gracias a sus buenos perros tiradores. Alcanzaron el Polo el 14 de diciembre, tras dos meses de travesía. El regreso fue aún más rápido: la superficie era firme y la ruta discurría cuesta abajo. «Tuvimos el viento de espaldas, sol y buena temperatura todo el trayecto», escribiría después Amundsen. Las raciones de víveres para los hombres y los perros iban apareciendo conforme llegaban a los depósitos de provisiones. Apenas tar-



we shall stick it out
to the end but we
are getting weaker of
course and the end
cannot be far,
It seems a pity but
I do not think I can
write more —
R Scott
Last entry
For God's sake look
after our people

FRUSTRACIÓN Y MUERTE

Scott, Wilson, Evans y Oates en el Polo, en una fotografía tomada por Bowers tras hallar la bandera noruega izada un mes antes por Amundsen. La última anotación en el diario de Scott (*arriba*) data del 29 de marzo de 1912, probablemente poco antes de morir: «Perseveraremos hasta el final, pero cada vez nos encontramos más débiles, por supuesto, y el fin no puede estar lejos. Es una pena, pero no creo que pueda escribir más. —R. Scott —Última anotación —Por el amor de Dios, velad por nuestra gente».

INSTITUTO SCOTT DE INVESTIGACIÓN POLAR, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*izquierda*); GETTY IMAGES (*derecha*)

daron cinco semanas en regresar; Amundsen incluso había ganado peso. Cuando Scott llegó al Polo, el 17 de enero de 1912, encontró allí la bandera noruega. «Dios todopoderoso», escribió, «este lugar es horrible».

EL REGRESO

Lo peor estaba por llegar. Las temperaturas bajaron de manera drástica y la nieve adquirió una textura arenosa. Cada día, los tiradores del trineo expresaban en sus diarios las mismas quejas: había que arrastrar sin descanso para no avanzar nada. En algunos tramos, las cuchillas se hundían tanto en la superficie que las barras abrían surcos en la nieve. Disponían de comida, pero esta no bastaba para cubrir las necesidades calóricas de una travesía en aquellas condiciones.

La salud de los hombres empeoró. Evans se hizo un corte en la mano y la herida se infectó. Oates presentaba graves signos de congelación. Aunque sin diagnosticar, todos mostraban síntomas de escorbuto. A pesar de ello, se tomaron un tiempo para realizar algunas observaciones geológicas. Mientras descendían el glaciar Beardmore, se desviaron hacia una morrena bajo el monte Buckley. El 8 de febrero, después de comer, Scott escribió en su diario: «La morrena resultaba tan interesante que... decidí acampar allí y pasar el resto del día realizando investigaciones geológicas. [...] Nos hallábamos ante precipicios perpendiculares de arenisca Beacon que se erosionaba con rapidez y presentaba auténticas vetas de carbón, en las que el ojo avizor de Wilson ha sabido distinguir huellas de plantas. El último ejemplar es un trozo de carbón con preciosos dibujos de hojas dispuestas en capas». Las plantas tenían el aspecto de *Glossopteris*. Con la ayuda de Bowers, Wilson recogió unos 16 kilos de rocas y fósiles.

Evans y Oates fueron los primeros en perder la vida. Tras una semana tambaleándose cuesta abajo por el glaciar, Evans se mostraba cada vez más desorientado; perdió el conocimiento y falleció el 17 de febrero. El estado de congelación de Oates empeoró hasta que ya no pudo mantenerse en pie. No consintió que su estado retrasara al grupo. Para que eso no ocurriera, abandonó la tienda durante una tormenta de nieve el 16 de marzo. «Voy a salir y quizá me quede fuera un tiempo», informó al resto. Jamás regresó.

Los demás reanudaron la marcha el 19 de marzo. Habían dejado atrás todo menos lo absolutamente esencial; a petición de Wilson, llevaron también consigo sus diarios, los cuadernos de campo y las muestras geológicas. Los arrastraron hasta el que sería su último campamento, donde una tormenta de nieve los retuvo durante ocho días, a tan solo 18 kilómetros de un depósito de provisiones clave. Se quedaron sin comida y sin combustible. Murieron juntos, con Wilson y Bowers en posición durmiente y Scott situado entre ambos, con su saco abierto y un brazo sobre Wilson.

Un equipo de búsqueda los halló la primavera siguiente, congelados, junto a sus notas y muestras. Wilson había acertado respecto a los fósiles: se trataba de la tan perseguida *Glossopteris*. «Los 16 kilos de especímenes recogidos por el equipo polar en el Monte Buckley», escribió Debenham, «exhiben las mejores características para poner fin a una prolongada controversia entre geólogos respecto a una unión pasada entre la Antártida y Australasia». Wilson, investigador implacable y de gran fervor religioso, habría estado satisfecho. Darwin estaba en lo cierto y él había ayudado a demostrarlo.

PARA SABER MÁS

The coldest march. Susan Solomon. Yale University Press, 2001.

El último lugar de la Tierra: La carrera de Scott y Amundsen hacia el Polo Sur. Roland Huntford. Ediciones Península, 2002.

The worst journey in the world. Apsley Cherry-Garrard. Penguin, 2006.

Scott of the Antarctic. David Crane. Vintage, 2007.

Robert Falcon Scott journals: Captain Scott's last expedition. Reedición. Dirigido por Max Jones. Oxford University Press, 2008.

An empire of ice: Scott, Shackleton and the heroic age of antarctic science. Yale University Press, junio de 2011.

Instituto Scott de Investigación Polar: **www.spri.cam.ac.uk**

BIOLOGÍA

Medir la salud celular

Basándose en sus investigaciones sobre los telómeros, galardonadas con un premio Nobel, Elizabeth H. Blackburn intenta descubrir una forma sencilla de evaluar los riesgos individuales de enfermar

Thea Singer

Un reloj molecular que reside en nuestras células sigue generando titulares decenios después de que Elizabeth H. Blackburn llevase a cabo estudios pioneros sobre su funcionamiento. Los experimentos más recientes de Blackburn y otros investigadores han demostrado que esos relojes, los telómeros, pueden servir de barómetros que informen sobre la salud futura de una persona.

Los telómeros, segmentos de ADN localizados en los extremos de los cromosomas, evitan que estos se desgasten o se adhieran unos a otros. Pero cada vez que una célula se divide, los telómeros se acortan un poco. Esa reducción ha convertido a los telómeros en marcadores del envejecimiento celular. En algunas células, una enzima denominada telomerasa repone los segmentos perdidos. En otras, en cambio, el acortamiento sigue adelante sin que nada lo detenga. Cuando la merma de material alcanza cierto punto, las células dejan de dividirse y entran en un estado latente de senescencia o se mueren. Blackburn y Carol W. Greider, que en su día fue alumna suya y en la actualidad trabaja en la Universidad Johns Hopkins, junto con Jack W. Szostak, de la facultad de medicina de Harvard, fueron galardonados en 2009 con el premio Nobel de fisiología o medicina por descubrir varios de estos procesos.

Blackburn, que trabaja en la Universidad de California en San Francisco, jamás se ha detenido para recuperar el aliento. En 2004, ella y la fisióloga de la salud Elissa S. Epel publicaron un artículo en el que relacionaban el estrés fisiológico con el acortamiento de los telómeros de los leucocitos de la sangre. El trabajo supuso un estímulo en el campo de la investigación de los telómeros. Hoy en día, numerosos estudios demuestran la relación entre la reducción de los telómeros y varias enfermedades. Y a la inversa, algunos comportamientos, como hacer deporte o reducir el estrés, se han asociado a telómeros más largos. Estos resultados han hecho pensar en la posibilidad de utilizar la longitud de los telómeros, determinada con un sencillo análisis de sangre, para obtener una instantánea de la salud general y echar un vistazo al proceso de envejecimiento.

En 2010, Blackburn fundó junto con otros la compañía Telome Health en Menlo Park, California, para ofrecer esa prueba a centros de investigación y a particulares (por prescripción médica). En Madrid, María Blasco, directora del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas, ha puesto en marcha la empresa Life Length, que analiza los telómeros. La noticia del inminente lanzamiento de estas pruebas suscitó una controversia en torno a su utilidad. La redactora científica Thea Singer entrevistó en fecha reciente a Blackburn para hablar sobre su trabajo.

EN SÍNTESIS

Elizabeth H. Blackburn, de la Universidad de California en San Francisco, es bióloga celular y molecular. Investiga la estructura y el funcionamiento del ADN que remata los extremos de los cromosomas.

Blackburn ha extendido su trabajo sobre los telómeros, merecedor de un premio Nobel, al desarrollo de métodos que evalúen el riesgo global de sufrir una cardiopatía, cáncer u otras dolencias crónicas.

En esta entrevista se debate, entre otros aspectos, sobre la utilidad de esas pruebas y el riesgo de malinterpretar sus resultados.



CODY PICKENS

Se ha hablado mucho sobre el modo en que «envejecen» las células conforme se acortan los telómeros. Pero ¿cómo se relaciona ese acortamiento con el envejecimiento de todo el organismo?
Numerosos estudios demuestran que la reducción de los telómeros permite pronosticar el riesgo de padecer ciertas dolencias, como las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, el alzhéimer y algunos tipos de cáncer, o incluso de fallecer. Mary Whooley, colega mía en la Universidad de California en San Francisco, realizó un estudio, «Heart and Soul», en el que evaluó durante cuatro años a 780 personas de 60 años o más de edad: observó que los telómeros cortos representaban un indicador del riesgo de mortalidad. El genetista de la Universidad de Utah Richard Cawthon hizo un seguimiento a 143 personas durante un período de entre 15 y 20 años y descubrió que la mortalidad de las que poseían telómeros más cortos casi doblaba la de aquellas con telómeros más largos.

Quizá debiéramos cambiar entonces el modo de referirnos al acortamiento de los telómeros y sustituir términos como «envejecimiento» y «envejecimiento celular» por frases como «riesgo de contraer enfermedades asociadas al envejecimiento».
Sí, así es. Creo que el concepto de envejecimiento resulta inadecuado en este contexto.

¿Qué pruebas hay de que los acontecimientos vitales negativos, como el estrés crónico o el trauma infantil, se correspondan con un acortamiento de los telómeros?
Fijémonos en el trauma infantil. Las investigaciones demuestran que el número de esos sucesos se relaciona de forma cuantitativa con el acortamiento de los telómeros en la etapa adulta: cuantos más traumas, más se reducen los telómeros. Por otro lado, nuestro estudio demostró una sorprendente correlación entre el número de años de estrés crónico padecido por las madres de niños crónicamente enfermos y el acortamiento de los telómeros.

Los estudios a largo plazo indican la posibilidad de retrasar la reducción de los telómeros, o incluso de aumentar su longitud, mediante comportamientos como la dieta y el ejercicio físico.
Tras estudiar durante cinco años a personas con arteriopatía coronaria estable, descubrimos que aquellas con un mayor nivel de ácidos grasos omega-3 de origen marino en sangre solían presentar un menor acortamiento de los telómeros. De hecho, aquellas cuyos telómeros se alargaron durante ese periodo tendían a poseer niveles superiores de omega-3 al iniciar el estudio. Tenemos datos sobre lo que sucedió en esos pacientes, pero todavía no se han publicado.

¿Deberíamos entonces incrementar la ingesta de omega-3?
Los individuos analizados tenían unos 60 años de edad y padecían una enfermedad coronaria leve que se había estabilizado al comienzo del estudio. Los resultados presentados se refieren a ese grupo, por lo que podrían no cumplirse en personas de entre 80 y 90 años o de entre 15 y 20 años.

Usted ha dicho que el modelo médico tradicional se centra en realizar análisis que ayuden a decidir el mejor tratamiento para erradicar un agente infeccioso. Pero hoy los médicos se las tienen que ver a menudo con enfermedades crónicas que surgen a raíz de un conjunto complejo de causas. ¿Qué aporta la investigación de los telómeros al respecto?
La investigación de los telómeros no se fija en un único diagnóstico. En la mayoría de las personas observamos relaciones estadísticas con un conjunto de enfermedades progresivas que suelen presentarse juntas y se hacen más frecuentes con la edad. Creemos que esos males podrían responder a factores biológicos similares. La idea de que la inflamación crónica —que se deduce a partir del acortamiento de los telómeros de los leucocitos o incluso puede que esté provocada por él— represente la causa subyacente de dolencias que tratamos por separado, como la diabetes y la enfermedad cardiovascular, despierta un enorme interés. La longitud de los telómeros es un número que engloba múltiples influencias fisiológicas.

¿Cree que los médicos adoptarán este nuevo punto de vista?
En mi opinión, los médicos desean aplicar métodos factibles. Y creo que la idea de utilizar la longitud de los telómeros como una estrategia de monitorización resultaría factible.

Su artículo sobre «intercepción del cáncer», en el que se utilizan fármacos y otros métodos activos para detener la enfermedad antes de que se haya establecido, encaja en este concepto.
Es verdad. La clave reside en la intercepción temprana, antes de que el cáncer alcance la fase de pleno desarrollo, que conlleva enormes costos humanos y económicos. Las investigaciones han permitido identificar etapas cada vez más tempranas de la enfermedad y el modo en que esta avanza. Hoy conocemos el fármaco que podría funcionar en una fase incipiente de un cáncer determinado. La idea, llevada al extremo, consistiría en averiguar los factores de riesgo de una persona respecto a un tipo de cáncer y poder tratarla antes de que sufriera la enfermedad. De hecho, se están estudiando grupos de alto riesgo para algunos tipos de cáncer de colon, para los que hay diversas formas de interceptarlos.

¿Qué lugar ocupan los telómeros en la estrategia de la intercepción?
En los ratones se ha demostrado que los telómeros cortos se asocian a un enorme riesgo de contraer cáncer. Todavía desconocemos ese efecto en los humanos, aunque ya se ha verificado en algunos grupos de personas. En ciertos grupos de cáncer o algunos cánceres específicos, los telómeros cortos permiten pronosticar el riesgo de la enfermedad en el futuro. Ello podría deberse a que el sistema inmunitario —lo que se investiga cuando se analizan los telómeros de los leucocitos— se está viendo alterado. O tal vez se está padeciendo un estado inflamatorio crónico que provoca el cáncer. O las propias células cancerosas presentan una inestabilidad genómica debido a que sus telómeros son demasiado cortos, lo que origina la enfermedad.

¿Existe un componente genético asociado a la longitud de los telómeros y al riesgo de padecer cáncer?
Jiang Gu, del Centro M. D. Anderson para el estudio del Cáncer en la Universidad de Texas, lideró un interesante estudio que parece apuntar en ese sentido. Su grupo examinó si los telómeros cortos y el riesgo de cáncer iban de la mano, desde un punto de vista genético. El artículo que publicaron se centraba en el cáncer de vejiga. Se preguntaron: ¿Qué variación en el genoma se asocia al riesgo de cáncer? Identificaron una variante genética asociada a la vez a los telómeros cortos y al riesgo de contraer cáncer. Al buscar el gen en cuestión, descubrieron que este se ha-



Indicadores de la mortalidad: los telómeros, en los extremos de los cromosomas, brillan con intensidad en esta imagen.

PASIEKA, PHOTO RESEARCHERS, INC.

llaba implicado en la función de las células inmunitarias.

Titulares recientes afirman que el análisis de los telómeros nos informará sobre nuestra longevidad. Explique por favor, con fundamentos científicos, lo que nos indicará ese análisis.

La idea de que el análisis predecirá el tiempo que uno va a vivir resulta errónea. La prueba no va a diagnosticarnos una enfermedad. Ni nos va a decir si llegaremos a los 100 años. Pero con el tiempo, si se contempla de manera estadística, nos indicará probabilidades de contraer algunas de las enfermedades comúnmente asociadas al envejecimiento. El nombre de la compañía Life Length (que, como la nuestra, mide la longitud de los telómeros) debió despertar ideas falsas a la gente. La elección de ese nombre tal vez no fuera muy afortunada.

¿Cuál es el modo más eficaz de realizar los análisis?

Todavía no sabemos si existe una manera óptima. Sabemos que se pueden observar cambios en la longitud de los telómeros en seis meses, o incluso en cuatro, pero no en una semana. Sobre la base de principios científicos, cuantas más medidas se representen en un gráfico, mejor se podrán observar las tendencias. Por tanto, la estrategia de los seis meses parece razonable.

El análisis de los telómeros nos recuerda al del colesterol: ofrece un percentil que permite conocer la posición de uno respecto a una población normal de personas con una edad, sexo, estilo de vida y comportamiento similares.

Así es, aunque el colesterol guarda una relación más específica con la enfermedad cardiovascular. El análisis de los telómeros nos aporta una información más general. Podríamos compararlo con el peso, que sirve como indicador de numerosos aspectos de la salud. Si se sobrepasa cierto peso, nuestra salud se verá afectada. De modo análogo, también resultará perjudicial poseer telómeros muy cortos. Pero existe una amplio abanico de posibilidades entre las situaciones extremas. Los doctores miran el peso porque representa un parámetro útil. Y lo examinan a lo largo del tiempo. Creo que la longitud de los telómeros es algo parecido; constituye una cifra que integra numerosas características. Aunque, clínicamente, nadie lo utilizaría como único indicador.

Quienes critican el análisis de los telómeros afirman que, a diferencia de las pruebas de colesterol, en las que se han podido establecer clasificaciones como colesterol «alto» o «bajo» gracias a los abundantes datos existentes, todavía no hay información suficiente para fijar normas relacionadas con la longitud de los telómeros.

No creo que eso sea cierto. Sin duda se puede separar a las personas en grupos, según el resultado del análisis. En la actualidad hay cientos o miles de longitudes de telómeros medidas en diversos grupos y creo que tenemos una idea bastante clara sobre lo que puede predecir la prueba. Por supuesto, siempre es mejor disponer de más datos. Pero hay que empezar por algún sitio. Existía una enorme demanda del análisis, no solo en el ámbito científico, sino también en el particular. La idea consistía en empezar a realizar medidas sin exagerar sobre la precisión de las conclusiones que se podían extraer de ellas.

¿Por qué decidió poner en marcha una empresa en vez de realizar las medidas en su laboratorio de la Universidad de California en San Francisco (UCSF)?

Era importante disponer de una técnica sensible y fiable para ofrecer esas medidas. En la UCSF, nuestra capacidad para atender todas las peticiones se vio desbordada, de modo que transferimos la tecnología a la empresa.

¿Qué tiene que decir sobre el temor a que las compañías de seguros de vida o de seguros médicos utilicen los resultados de las pruebas de los telómeros para determinar si se ofrece o no cobertura?

No podemos esconder la información. Pero desde luego trataremos de asegurar que cualquier información clínica que proporcionemos sea exacta, se interprete en el contexto adecuado y no se utilice de forma incorrecta con motivos discriminatorios. Además, puesto que los resultados de los análisis solo proporcionan probabilidades, constituirían una pobre fuente de información a la hora de realizar este tipo de decisiones. Es una cuestión que hay que tener siempre en cuenta. Nuestro objetivo consiste en ofrecer la prueba como una forma de ayudar a la gente a tomar un mayor control sobre su propia salud.

Los críticos comparan los análisis de telómeros con las pruebas genéticas dirigidas al consumidor, a veces sobrevaloradas, que permiten descubrir las variaciones genéticas de una persona e indican su predisposición a diversas enfermedades. ¿En qué se diferencian de estas los análisis de telómeros?

Los análisis de telómeros no se ofrecen directamente al consumidor. Ese aspecto debería quedar muy claro. Nuestro objetivo consiste en empezar a ofrecerlos a través de los profesionales de la salud. Distintos estudios con numerosos grupos de personas han puesto de manifiesto una clara relación estadística entre los telómeros cortos y el riesgo de padecer ciertas enfermedades. La ciencia de los telómeros ha avanzando a gran velocidad en los últimos tiempos y a veces resulta difícil mantenerse al día para los científicos que no están implicados en esos estudios.

¿Se hará usted un análisis de telómeros?

Sí, cuando la compañía empiece a ofrecer pruebas a particulares. Estoy deseando hacerlo.

Thea Singer es periodista científica.

PARA SABER MÁS

Stress less. Thea Singer. Hudson Street Press, 2010. Una investigación sobre el estrés, los telómeros y el envejecimiento.

Decoding immortality. Un documental del Smithsonian Channel sobre el trabajo de Blackburn: **www.smithsonianchannel.com/site/sn/show.do?show=137613**

Conferencia de Elizabeth Blackburn en la ceremonia de entrega de los Premios Nobel de 2009: **http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2009/blackburn-lecture.html**

FÍSICA

A LA ESPERA

El acelerador de partículas Tevatrón cerró el pasado 30 de septiembre tras 28 años de funcionamiento impecable. El análisis de los datos acumulados continuará durante algunos años

Tim Folger



DEL HIGGS



Cae la noche: El acelerador de partículas Tevatrón, cerca de Chicago, ha sido durante 28 años la mejor ventana al universo subatómico.

Tim Folger escribe sobre temas científicos. Ha recibido varios premios y coordina la serie *The best american science and nature writing* («Los mejores escritos estadounidenses sobre ciencia y naturaleza»), una antología anual publicada por Houghton Mifflin.



BAJO LAS BUCÓLICAS PRADERAS DE ILLINOIS, CIRCULABAN HASTA HACE POCO PROTONES Y ANTIprotones a lo largo de un túnel de seis kilómetros de longitud. Cada segundo, cientos de miles de ellos chocaban y se desintegraban en ráfagas de otras partículas. Hablamos del Tevatrón, el acelerador de partículas del Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab) en Batavia, unos 80 kilómetros al oeste de Chicago. El centro ha vivido numerosos días de rutina junto a otros espectaculares: de las 17 partículas elementales que los físicos teóricos creen que componen toda la materia ordinaria y la energía del universo, tres han sido descubiertas allí. El pasado 30 de septiembre, el suministro eléctrico de los más de mil imanes superconductores refrigerados con helio líquido se detuvo para siempre. Concluían así 28 años de funcionamiento del que, hasta hace poco, había sido el acelerador de partículas más potente del mundo.

Para los cientos de físicos que han dedicado casi dos décadas a la búsqueda de una partícula hipotética conocida como bosón de Higgs, el cierre significa abandonar la competición —y la posible gloria del Nobel— en favor del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el nuevo acelerador del CERN, emplazado en la frontera franco-suiza. Con un túnel de más de 27 kilómetros de circunferencia y una potencia mucho mayor, el LHC desplazó al Tevatrón como instrumento principal en la investigación en física de partículas; una posición que, sin duda, mantendrá durante la próxima década.

La decisión del Departamento de Energía estadounidense de concluir los experimentos del Tevatrón no sorprendió a nadie en el Fermilab. Algunos habían recomendado alargar la vida del acelerador otros tres años para concederle una última oportunidad de encontrar el escurridizo bosón de Higgs, que los teóricos consideran responsable de dotar de masa a todas las demás partículas elementales. Pero incluso los más fervientes defensores del Tevatrón admiten que la máquina se había convertido en algo superfluo. «No siento tristeza», afirma Dimitri Denisov, coportavoz de la colaboración que operaba D0, uno de los dos detectores del acelerador. «Es como tu coche viejo. La historia de la ciencia se escribe con nuevas herramientas. Esta ha durado más de 25 años. Es hora de pasar página.»

No son palabras fáciles para Denisov. Hace dos años, durante una conferencia de prensa en el congreso anual de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, Denisov sostuvo que el Tevatrón contaba con muy buenas posibilidades de observar indicios del bosón de Higgs antes que el LHC. En esos días, un fallo eléctrico había condenado al LHC a un cierre de varios meses, por lo que muchos en el Fermilab compartían las esperanzas de Denisov. Pero no ocurrió así. El LHC comenzó sus operaciones en noviembre de 2009 y, pocos meses después, su energía ya triplicaba a la del Tevatrón.

Durante las últimas tres décadas, el principal competidor de D0 había sido CDF, el otro gran detector del Tevatrón, situado en el mismo túnel a apenas dos kilómetros de D0. En cada experimento trabajaban cientos de físicos procedentes de decenas de países.

En la primavera de este año, la colaboración CDF anunció indicios de lo que parecía una nueva partícula. ¿Había hallado el Tevatrón, en su ocaso, las primeras señales del bosón de Higgs? El equipo de Denisov se puso de inmediato a revisar sus propios datos en busca de una corroboración, pero el análisis de D0 no mostró nada anómalo. «Deseo vencer a Dimitri, y viceversa», afirma Rob Roser, codirector de la colaboración CDF. «Tenemos una relación amistosa, hablamos y somos amigos,

EN SÍNTESIS

El Tevatrón, el acelerador de partículas más potente del mundo durante 27 años, cerró el pasado 30 de septiembre. El relevo ha sido tomado por el LHC del CERN, cerca de Ginebra.

A pesar de su clausura, los expertos continúan analizando la gran cantidad de datos acumulada por el acelerador. Aún podrían hallar algún indicio sobre el bosón de Higgs.

Los científicos del Fermilab esperan construir un nuevo acelerador, el Proyecto X, para 2020. Se espera que sirva como banco de pruebas para diseñar el sucesor del LHC.

CORTESÍA DE FERMILAB (*páginas anteriores*)

pero siempre hemos querido superarnos el uno al otro. Ahora, la situación ha cambiado; el malo de la película es el LHC, no Dimitri. Nunca quise que el LHC nos superase a ninguno de los dos. Ya se sabe, solo yo puedo sacudir a mi hermano pequeño, no los demás.»

Con las viejas rivalidades casi olvidadas y nuevos proyectos en ciernes, el Fermilab atraviesa un período incierto. Lo mismo puede decirse de toda la física de partículas. Los expertos han esperado muchos años hasta contar con un acelerador que pudiese aportar nuevas pistas sobre el mundo subatómico. Dado que el LHC espera doblar la energía de sus colisiones en los próximos dos años, no faltan las ideas sobre lo que podría llegar a observar: nuevas dimensiones del espacio, supersimetría (la idea de que por cada partícula conocida existiría una «supercompañera», aún por descubrir) y, por supuesto, el bosón de Higgs. No obstante, la mejor noticia provendría de algo completamente inesperado. Pero existe también otra posibilidad, por lo general infravalorada pero imposible de descartar; algo que preocupa a la vez que intriga a los expertos: ¿qué ocurriría si ni el LHC ni los futuros experimentos planeados en el Fermilab hallan nada durante la próxima década?

DESTINO DESCONOCIDO

No hace tanto que los físicos albergaban las mismas esperanzas sobre el Tevatrón que las que ahora depositan en el LHC. Quince años antes de que el LHC empezase a funcionar, los expertos del Tevatrón creían que, entre otros éxitos, encontrarían el Higgs, hallarían indicios de supersimetría e identificarían la naturaleza de la materia oscura.

Además de lograr un premio Nobel, el descubrimiento del Higgs supondría el colofón de una época brillante para la física. De entre todas las partículas predichas por el modelo estándar, un impresionante edificio teórico que describe el universo a partir de 17 partículas elementales, el Higgs es la última que falta por descubrir. La teoría da cuenta de tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la interacción fuerte, responsable de la cohesión de los núcleos atómicos; la débil, causante de las desintegraciones radioactivas, y la electromagnética. Los físicos teóricos completaron la construcción del modelo estándar hace casi cuarenta años; desde entonces, todas y cada una de sus predicciones se han venido confirmando con gran precisión.

En 1995, el Tevatrón efectuó una de las verificaciones más impresionantes de dicha teoría al descubrir el quark *cima*, una partícula elemental dotada de gran masa cuya existencia fue predicha en 1973. En aquella ocasión, el Tevatrón venció al que por entonces era su rival europeo, el Supersincrotrón de Protones, una máquina que ahora se emplea para suministrar partículas al LHC. El hito supuso un gran triunfo para el Tevatrón, al tiempo que confirmó la elevada precisión con la que el modelo estándar describe nuestro universo, al menos hasta la escala de energías accesible en los aceleradores.

En 2001, tras una serie de trabajos de mejora que se prolongaron durante cinco años, el acelerador más potente del mundo lo era aún más. Se esperaba que el nuevo Tevatrón descubriera no solo el Higgs, sino también otros fenómenos no predichos por el modelo estándar. Con independencia de sus éxitos, los expertos saben desde hace tiempo que dicha teoría no proporciona una descripción completa de la naturaleza. Además de no incorporar la gravedad, adolece de otras dos carencias fundamentales. En primer lugar, no soluciona el problema de la materia oscura, una sustancia misteriosa cuyos efectos gravitatorios

HITOS

Tres décadas de descubrimientos

Casi todo lo que se necesita saber sobre un acelerador de partículas puede resumirse en dos cifras. La primera es su energía: cuanta más energía se alcance en las colisiones, mayor será la masa de las partículas producidas. La segunda es su luminosidad, o el numero de colisiones por segundo. Durante la primera década de funcionamiento, los ingenieros del Tevatrón se afanaron en aumentar la energía del acelerador; después, trabajaron para pasar de unas pocas colisiones por segundo a un intenso bombardeo. He aquí un resumen de los acontecimientos más notables en la vida del Tevatrón.

5 de julio de 1979
El Departamento de Energía de EE.UU. autoriza al Fermilab a construir un acelerador superconductor. Más tarde, este sería bautizado como Tevatrón.

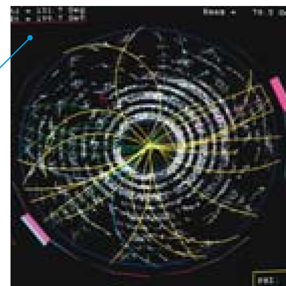
3 de julio de 1983
El Tevatrón acelera protones a una energía récord de 512 gigaelectronvoltios (GeV).

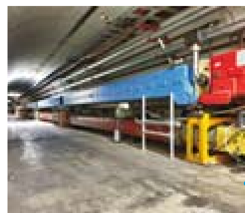
1 de octubre de 1983
Comienzo de los experimentos. Al principio, un haz de protones bombardeaba un blanco fijo.

13 de octubre de 1985
Inicio de las colisiones entre haces de protones y de antiprotones. El detector CDF registra las primeras colisiones protón-antiprotón a 1600 GeV.

3 de marzo de 1995
Las colaboraciones CDF y D0 anuncian el descubrimiento del quark *cima*.

31 de agosto de 1992
La energía de las colisiones asciende hasta 1800 GeV. Empieza la primera serie de toma de datos.





20 de julio de 2000
El experimento DONuT observa los primeros indicios directos de la existencia del neutrino tauónico.

1 de marzo de 2001
Los trabajos de mejora permiten alcanzar una energía de 2000 GeV. Comienza la segunda fase de toma de datos.

30 de septiembre de 2011
El Tevatrón colisiona protones y antiprotones por última vez. El análisis de datos continuará durante algunos años.

4 de agosto de 2008
Primeros límites de exclusión al bosón de Higgs. Los expertos descartan una masa de 170 GeV para la partícula.



CORTESÍA DE FERMILAB

afectan a la dinámica de las galaxias pero que, por lo demás, no parece interaccionar con la materia ordinaria. Además, también falla al explicar el origen de la energía oscura, un fenómeno desconcertante que parece acelerar la expansión del universo. Pero, a pesar de todas las mejoras, el Tevatrón siguió sin ver nada más allá de la teoría que con tanta precisión había confirmado. Según Bob Tschirhart, físico teórico del Fermilab: «Hay una realidad ahí fuera que aún no hemos descubierto. El modelo estándar ha hecho un trabajo excelente al explicar muchas cosas muy bien, pero sufre deficiencias obvias».

En cierto sentido, el legado del Tevatrón consiste en haber demostrado el elevadísimo grado de precisión con el que el modelo estándar describe la naturaleza. Una hazaña en absoluto desdeñable, pero que no era la que se perseguía. «Claro que se suponía que encontraríamos el Higgs», confiesa Stephen Mrenna, físico computacional que llegó al Fermilab a mediados de los noventa. «Y si la supersimetría estaba ahí, se creía que también la veríamos.»

Los físicos albergan ahora la esperanza de que el LHC triunfe allí donde el Tevatrón falló; que les lleve a territorios inexplorados y aporte las pistas necesarias para reemplazar al modelo estándar. Al igual que la mayoría de sus colegas de profesión, Mrenna piensa que el LHC encontrará el Higgs más bien pronto que tarde: «Creo que lo descubrirán este año o el próximo. Si para entonces no aparece, empezaré a pensar que no encontraremos nada de nada». Algunos teóricos postulan un gran «desierto» entre las escalas de energías de los experimentos actuales y aquellas a las que aparecerán fenómenos nuevos. De ser el caso, los descubrimientos podrían tardar varios decenios en llegar. Puede que el LHC sea el acelerador más potente jamás construido, pero resulta imposible asegurar que baste para acceder a otro nivel de la realidad.

La máquina que, sin lugar a dudas, habría logrado esa misión era el Supercolisionador Superconductor (SSC). Sus 97 kilómetros de circunferencia y una energía tres veces mayor habrían dejado muy atrás al acelerador europeo. Pero los problemas presupuestarios forzaron al Congreso de EE.UU. a cancelar el proyecto en 1993, aun con las obras ya en marcha en la pequeña ciudad de Waxahachie, en Texas. «El SSC se diseñó desde el principio para explorar una escala de energías en la que estábamos seguros de que algo nuevo debía ocurrir», explica Mrenna. «Era el acelerador que teníamos que haber construido. El LHC es un hermano pequeño y barato, pero por ahora resulta suficiente.»

¿Y si no fuera así? «Si el LHC no encuentra el Higgs ni realiza ningún otro descubrimiento», continúa Mrenna, «nos va a resultar difícil justificar el gasto en otro acelerador más avanzado. Podemos preguntarnos qué ventajas aporta la búsqueda del bosón de Higgs para la economía, la guerra contra el terrorismo o cualquier otro asunto. Por ahora ha bastado con explicar que el conocimiento nos beneficia a todos. La gente desea saber cómo funciona el universo. Estamos formando a muchas personas, y no es mala idea reclutar a las más inteligentes y ponerlas a trabajar en un problema realmente difícil, pues en general se derivan muchos beneficios de ello. Pero llega un momento en el que la física se torna menos y menos relevante».

En otras palabras, si ese desierto existe, puede que no surja la voluntad necesaria para cruzarlo. «El SSC me abandonó», explica Mrenna. «Yo era un estudiante posdoctoral en sus últimos días; desde entonces, he estado esperando su reemplazo mientras sobrevivía en un mercado de trabajo desalentador. Necesitamos un éxito. Necesitamos encontrar algo nuevo.»

PRÓXIMA VIDA

El primer acelerador de partículas fue construido en 1929 por Ernest Lawrence, físico de la Universidad de California en Berkeley. Lo denominó «tiovivo de protones». Medía 15 centímetros de diámetro, estaba fabricado con bronce, cera y vidrio, y costó unos 25 dólares. El LHC, que comenzó a funcionar unos 80 años más tarde, maneja un presupuesto de 10.000 millones de dóla-

EL TEVATRÓN Y EL LHC

La carrera hacia el bosón de Higgs

Geoff Brumfiel

A pesar del cierre del Tevatrón, la búsqueda del bosón de Higgs, la partícula más esquiva de la física, sigue su curso. En cuestión de meses, los datos obtenidos por el Tevatrón y por el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, deberían responder a lo que un físico ha descrito como «la pregunta de Shakespeare»: ¿ser o no ser?

La existencia de la partícula de Higgs fue predicha hace casi medio siglo. Suele considerarse la responsable de que todas las demás partículas elementales posean masa. Y es cierto. Pero la importancia del bosón de Higgs reside, sobre todo, en que permite unificar interacciones. Los físicos se deleitan con la simplicidad; gracias al Higgs, el electromagnetismo y la interacción nuclear débil pueden describirse como una sola fuerza, la interacción electrodébil.

Para que dicha unificación funcione, la masa del bosón de Higgs debe hallarse en el intervalo comprendido entre los 100 y los 1000 gigaelectronvoltios (GeV). Los datos obtenidos por el LHC y el Tevatrón se acercan a esa tierra fértil. En julio, en una conferencia en Grenoble, los responsables del Tevatrón descartaron la existencia de un Higgs del modelo estándar con una masa de entre 156 y 177 GeV. Por su parte, el LHC excluyó gran parte del intervalo de masas entre 150 y 450 GeV.

La mayoría de los físicos cree que, si el Higgs existe, lo más probable es que su masa se encuentre entre los 115 y los 150 GeV. Se trata de un intervalo muy delicado: la teoría predice que un Higgs de esa masa se desintegra la mayor parte de las veces en partículas comunes, pero muy difíciles de distinguir entre todas las que se producen en las colisiones. Existe incluso la posibilidad de que ya se hayan observado algunas desintegraciones del Higgs, pero se requieren muchas más colisiones para obtener un resultado con un nivel de confianza aceptable.

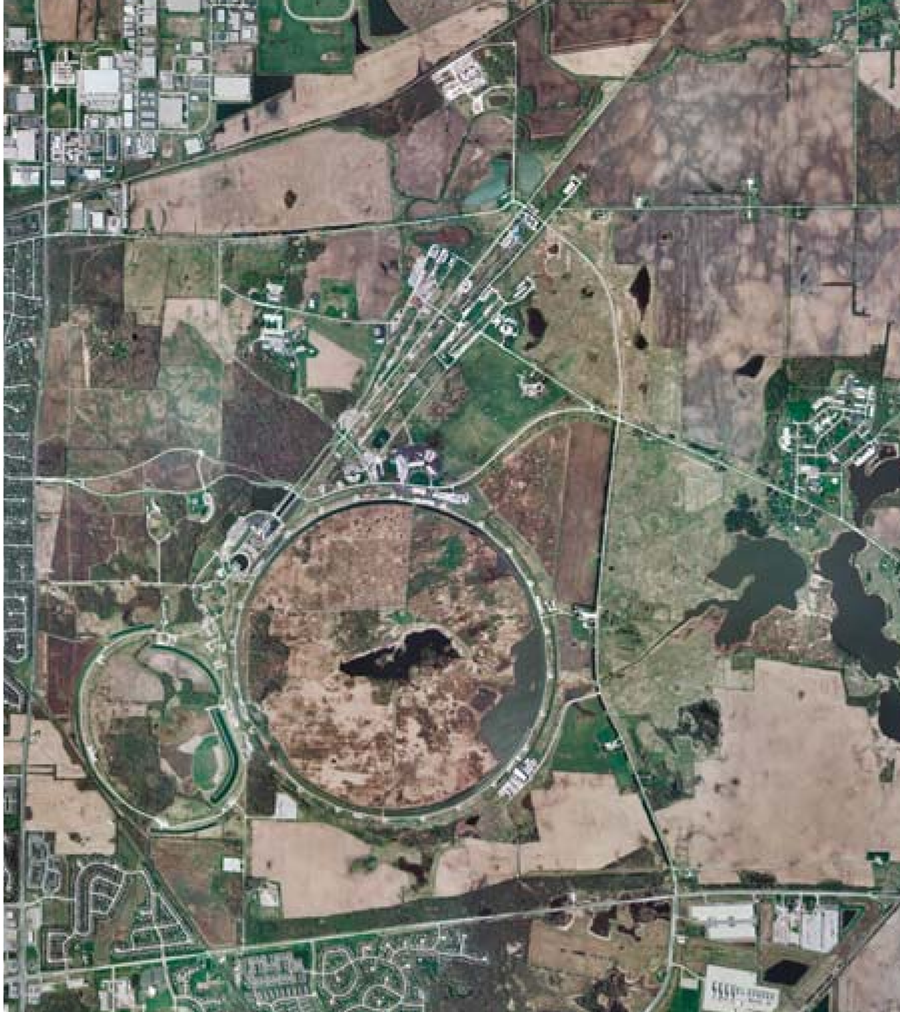
Ahora, el Tevatrón contribuirá a su búsqueda mediante el análisis de los datos que los expertos aún deben estudiar, si bien el descubrimiento definitivo del bosón de Higgs se espera que llegue de la mano del LHC. Con todo, los físicos probablemente no podrán asegurar si el bosón de Higgs es o no es hasta finales de 2012, cuando obren en su poder unos 50 petaoctetos de datos, el equivalente a 10.000 millones de veces las obras completas de Shakespeare.

Geoff Brumfiel trabaja como periodista para la revista Nature

res, su construcción ha necesitado una colaboración internacional y su tamaño es el de una ciudad pequeña. Incluso si el LHC logra un éxito espectacular, resulta difícil imaginar un incremento de proporciones similar en el futuro. «Sabemos cómo alcanzar energías diez veces mayores, pero eso cuesta diez veces más», explica Pier Oddone, director del Fermilab, «y hemos llegado al límite de lo que los países están dispuestos a invertir».

Durante la próxima década e incluso después, el mayor laboratorio de física de EE.UU. vivirá a la sombra del LHC. Oddone aclara que el Fermilab trabajará en otros proyectos que se habrían pospuesto o cancelado en caso de haber prolongado la vida de Tevatrón, pero no hay duda de que el centro de masas de la física de partículas se ha desplazado. «En un mundo perfecto, habríamos mantenido en funcionamiento el Tevatrón sin sacrificar otros proyectos», apunta, «pero carecíamos del dinero necesario». Uno de los experimentos del Fermilab versa sobre física de neutrinos; probablemente, las partículas elementales peor comprendidas. Un generador los dispara a través de 725 kilómetros de corteza terrestre hacia un detector situado en una mina en Minnesota. El Fermilab participará también en el experimento astronómico Dark Energy Survey, que persigue desentrañar la naturaleza de la energía oscura.

Con todo, la meta primordial de la institución sigue siendo disponer del acelerador de partículas más potente del mundo. En el año 2020, Oddone espera haber terminado la construcción de un nuevo acelerador, el Proyecto X. A corto plazo, la máquina se utilizará para generar neutrinos y otras partículas. Después, se convertirá en un campo de pruebas de las técnicas que algún día permitirán construir el sucesor del LHC.



Otros experimentos: A pesar del cierre del Tevatrón (*anillo central*), la física de partículas continúa en el Fermilab. El anillo inyector (*abajo a la izquierda*) genera neutrinos que son detectados en Minnesota, a 725 kilómetros de distancia.

CORTESÍA DE FERMILAB

«Concebimos el Proyecto X como un puente que nos permitirá regresar a la frontera de la física de altas energías», explica Steve Holmes, director del proyecto. «Es una oportunidad para volver a conseguir el liderato y retenerlo. Cuando la gente me pregunta sobre nuestro futuro aquí, suelo responder que EE.UU. ha liderado la investigación en física de partículas durante 70 años. Es el campo de investigación más fundamental que existe y, como gran país que somos, debemos aspirar a ello. Lo que no puedo decir es cuándo sucederá.»

Pero puede que aún no hayamos oído la última palabra del Tevatrón. Denisov, Roser y sus colaboradores han recogido datos suficientes como para mantenerse entretenidos en su análisis durante al menos dos años. Esa ingente cantidad de datos podría ayudar a dar forma a los primeros descubrimientos del LHC. Además, existe aún la remota posibilidad de que los discos duros del Fermilab escondan alguna sorpresa.

La pasada primavera, el Tevatrón pareció haber observado la primera pista de física más allá del modelo estándar. El equipo de Roser anunció en abril que había hallado indicios de la existencia de una nueva partícula o interacción en los datos del detector CDF. En un pequeño pero estadísticamente significativo numero de procesos, apareció un exceso de eventos sobre las predicciones del modelo estándar. Los datos mostraban lo que parecía la desintegración de una partícula masiva, quizás alguna versión inesperada del bosón de Higgs.

Para finales de mayo, la colaboración CDF había analizado más datos y la señal continuaba allí. Dos semanas más tarde, su compañero y rival Denisov anunció que el equipo de D0 había efectuado un análisis independiente del mismo fenómeno. Sin embargo, ellos no observaron nada anómalo.

No queda claro si la señal sobrevivirá a un análisis más detallado. Ambos grupos se encuentran ahora comparando sus datos con el objetivo de localizar el error en el análisis de CDF, en caso de que lo haya. Parece que, como viene ocurriendo desde hace treinta años, la llegada de una nueva era en física de partículas aún se hace de rogar. Sería una pena que la señal observada por CDF se desvaneciese. Haber descubierto el bosón de Higgs hubiera supuesto todo un final feliz para el Tevatrón. Durante el próximo año, comprobaremos si el LHC puede hacerlo mejor.

PARA SABER MÁS

El Gran Colisionador de Hadrones. Graham P. Collins en *Investigación y Ciencia*, n.º 379, págs. 15-23, abril de 2008.

Fermilab: Physics, the frontier and megascience. Lillian Hodderson, Adrienne W. Kolb y Catherine Westfall. University of Chicago Press, 2008.

Massive: The missing particle that sparked the greatest hunt in science. Ian Sample. Basic Books, 2010.

Universo cuántico. Revista *Temas de Investigación y Ciencia*, n.º 63, marzo de 2011.

Viaje a la escala electrodébil. Martin Gorbahn y Georg Raffelt en *Investigación y Ciencia*, n.º 415, págs. 68-77, abril de 2011.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.

¿Quién gira alrededor de quién?

Los modelos planetarios de Tycho Brahe y de Copérnico no se diferenciaban tanto; al menos, mientras ignoremos las fuerzas causantes del movimiento

Tyge Ottesen Brahe fue el último gran astrónomo que hubo de ingeniárselas sin telescopio. Nació en 1546, en la población entonces danesa de Schonen (hoy en el sur de Suecia). Estudió en Rostock. A los veinte años, perdió parte de su nariz en un duelo, motivo por el que a menudo aparece retratado con una de sus prótesis metálicas. Federico II hizo erigir para él los observatorios de Uranienborg y Stjerneborg, en la pequeña isla de Hven. Allí consiguió, gracias a un cuadrante mural, medidas astronómicas con una precisión de dos minutos de arco, algo jamás logrado hasta entonces y equivalente a casi una décima parte del diámetro aparente del disco lunar. Pero Federico II murió en 1599, y a su sucesor no le sobraba dinero para financiar actividades astronómicas —y astrológicas—. Brahe emigró a Praga, a la corte de Rodolfo II, quien comenzó a construir un observatorio para él. Sin embargo, el astrónomo falleció en 1601, por lo que jamás vio finalizar las obras. Con todo, las mediciones de Brahe constituyeron la base que permitió a Johannes Kepler realizar los complicados cálculos para derivar las trayectorias elípticas de los planetas. Con ello puso fin a la concepción circular del cosmos, imperante hasta entonces.

Hoy en día, el apellido Brahe y el nombre helenizado Tycho se relacionan, además de con dichas mediciones y con la supernova que observó en 1572, con su modelo de órbitas planetarias. Si nos retrotraemos a su época, podemos contemplar su sistema planetario como una solución poco entusiasta para reconciliar la imagen ptolemaica del mundo con la idea antitética de Nicolás Copérnico, quien pocos decenios antes había propuesto situar el Sol en el centro del universo.

En el modelo de Brahe, la Tierra (por supuesto, esférica) reposaba en el centro del universo. El Sol y la Luna orbitaban en círculos en torno a ella, mientras que el resto de los planetas describían trayectorias circulares alrededor del Sol. Ello explicaba los retrocesos aparentes en las órbitas planetarias según se observaban



Tycho Brahe (1546-1601)

COPÉRNICO Y TYCHO BRAHE CON TRANSPARENCIAS

Un poco de bricolaje nos permitirá ilustrar los modelos planetarios de Copérnico y de Tycho Brahe. Tome una transparencia (*borde azul*) y, con un punzón, realice un orificio, al que llamaremos «Tierra», y otros dos agujeros de ayuda (*azul*). A partir de otra transparencia, recorte tres bandas alargadas idénticas (*borde negro*) y efectúe dos orificios en cada una de ellas (*rojo y azul*). Estas servirán de brazos móviles: con ayuda de un botón, encaje los agujeros azules de cada una de las bandas en los orificios de la primera transparencia. Los rojos deberán unirse a los agujeros correspondientes que efectuará sobre una segunda lámina (*borde rojo*). Gracias a los tres brazos negros, ambas transparencias pueden realizar movimientos circulares sin girar sobre sí mismas, como hace una mano al borrar la pizarra.

El agujero de la transparencia «roja» que se encuentra unido a la Tierra se corresponde con el Sol. En ese agujero insertaremos dos brazos móviles más (*verde*). Los círculos verdes en sus extremos representarán Venus y Marte. Al mover cada uno de ellos con la mano, veremos que permanecen sobre los círculos de color rojo.

Si dejamos fija la transparencia inferior (*azul*) y movemos la otra, reproduciremos el modelo planetario de Tycho Brahe. Si, por el contrario, sujetamos la transparencia roja y desplazamos las demás, obtendremos el sistema de Aristarco de Samos o de Copérnico. Y nada ha cambiado, ni en las transparencias ni en las uniones.

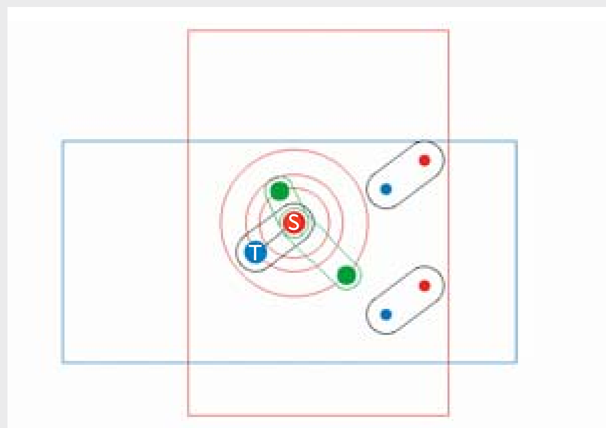
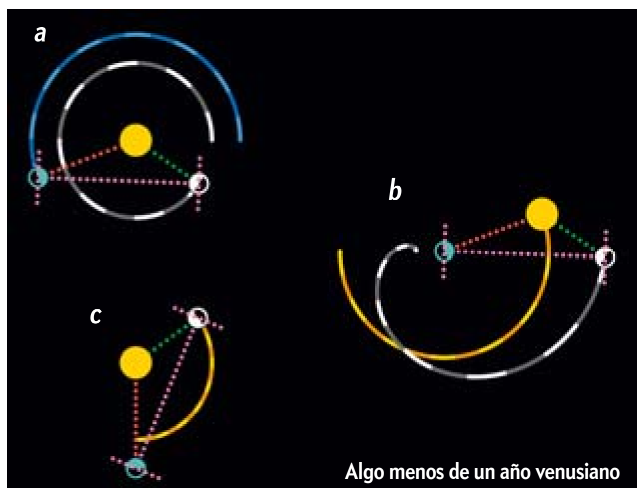
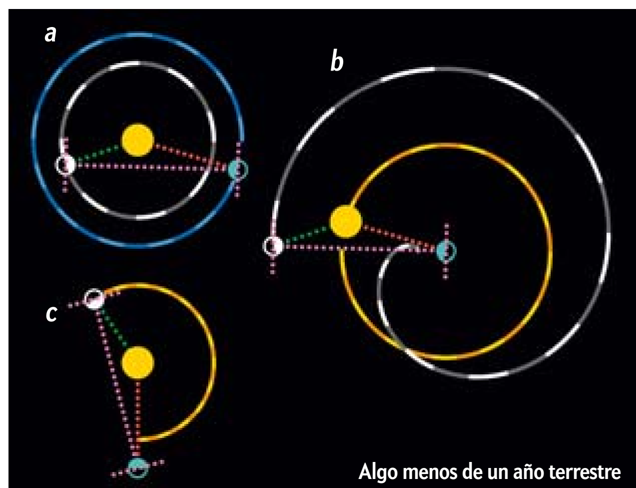
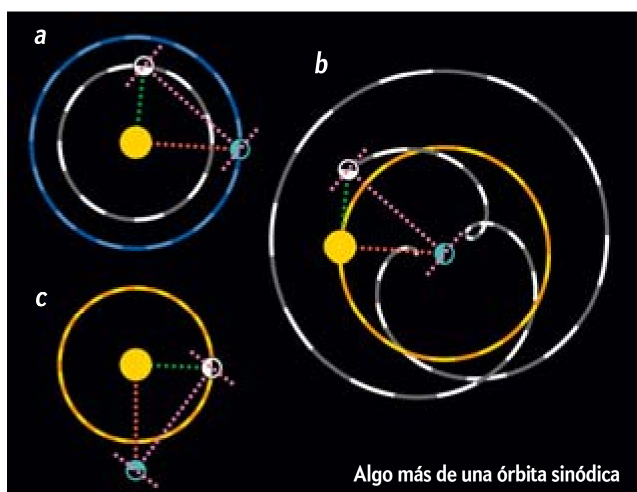
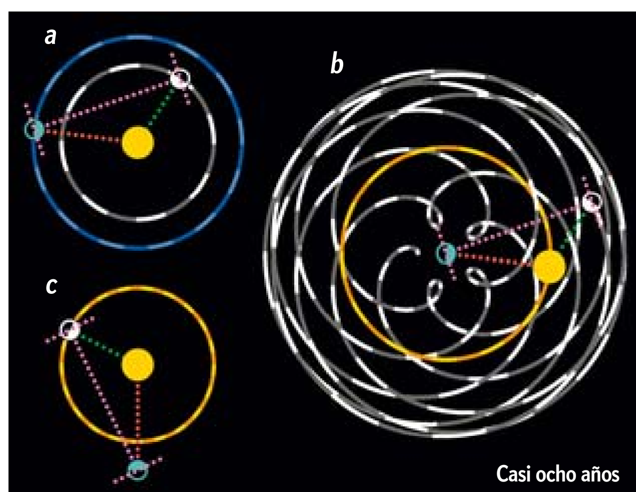


IMAGEN DE DOMINIO PÚBLICO (*Tycho Brahe*); NORBERT TREITZ (*esquema*), *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*









Cada imagen muestra el Sol (*amarillo*), **la Tierra** (*azul*) **y Venus** (*blanco*) **en tres sistemas de coordenadas diferentes: el sistema inercial heliostático de Aristarco de Samos y Copérnico** (*a*), **el sistema geostático de Heráclides Póntico y Tycho Brahe** (*b*) **y un sistema heliogeostático** (*c*), **que rota de manera solidaria con la línea que une el Sol y la Tierra. El tiempo queda representado por las líneas discontinuas sobre las órbitas. Las líneas de puntos unen los tres objetos y demarcan los límites de visibilidad mutua entre ambos planetas.**

NORBERT TREITZ, *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

desde la Tierra (con forma de lazo). Aquí veremos hasta qué punto el modelo de Brahe se asemejaba al de Copérnico. La diferencia entre ambos consiste en una mera transformación de coordenadas. Además, el sistema propuesto por Brahe evita tener que aceptar la afirmación copernicana de que nuestro planeta se desplaza a gran velocidad por el espacio sin que nos demos cuenta de ello. Hoy lo aprendemos en la escuela, pero no por ello deja de resultar sorprendente.

Por lo general, hablamos de sistemas «heliocéntricos» o «geocéntricos». Pero más importante que esa elección sobre el punto central resulta la del cuerpo que consideramos en reposo. Así, deberíamos hablar de un modelo *geostático* o *heliostático*. La diferencia fundamental reside en que el sistema heliostático es prácticamente inercial. Los sistemas geostáticos, por el contrario, se aceleran o rotan con respecto al resto del mundo.

Piense en una mesa sobre la que orbitan en círculos concéntricos varios objetos, cada uno con velocidad angular constante. Ahora, mueva la mesa de tal manera que uno de los «planetas» permanezca siempre sobre el mismo punto del suelo. Observará que, con respecto a dicho punto, la trayectoria del resto de los cuerpos se complica de manera considerable y adopta la forma de un lazo. En el caso de órbitas circulares exactas, dichos lazos conformarán epicicloides irracionales (que no cierran); en el caso de órbitas elípticas, obtendremos epicicloides generalizadas. El cambio de una perspectiva geostática a otra heliostática resulta análogo a la transición de la mesa en reposo a la mesa en movimiento. O, en otras palabras, consiste en una mera traslación, en la que el vector que la define depende del tiempo. Para verlo con facilidad, puede emplear transparencias unidas mediante botones, un método muy recomendable si no dispone de un ordenador o si mover mesas le resulta poco práctico.

Cada una de las figuras que reproducimos aquí muestra un sistema planetario formado por el Sol, la Tierra y Venus, en tres sistemas de referencia: uno heliostático (*a*, equivalente a dejar la mesa en reposo), otro geostático (*b*, con la mesa en rotación) y uno heliogeostático (*c*, en el que tanto la Tierra como el Sol permanecen inmóviles con respecto al suelo). El

tiempo queda representado por las líneas discontinuas sobre las órbitas. Cada par formado por un trazo oscuro y otro claro equivale a 1/13 años terrestres, unas cuatro semanas. A lo largo de millones de años, la resonancia entre la Tierra y Venus se ha aproximado a una relación de 13:8, por lo que cada par de líneas se correspondería con 1/8 del año venusiano. En las imágenes se ha idealizado la proporción 13:8 y las órbitas elípticas se han transformado en círculos, lo cual solo disimula algunos efectos poco llamativos. Todas las figuras muestran la perspectiva «desde arriba», desde la perpendicular al plano de la órbita terrestre, el cual difiere muy poco del de Venus. Las líneas de puntos unen los tres objetos y demarcan los límites de visibilidad mutua entre ambos planetas.

Esos «sistemas del mundo», que tanta controversia causaron hace 400 años, ¿poseen el mismo valor? Podemos también preguntarnos si, en un automóvil, el copiloto debe girar el plano de una ciudad con cada cambio de dirección, o mantenerlo siempre con el norte apuntando hacia el frente. Ambos procedimientos pueden resultar útiles. Para estudiar la colisión entre dos partículas pueden emplearse el sistema de referencia del laboratorio o el del centro de masas, ambos prácticos a la hora de medir y calcular. Asimismo, los fenómenos astronómicos se describen en primer lugar desde nuestro punto de vista en la Tierra. Incluso los astrónomos hablan de la salida y la puesta de un objeto cuando, «en realidad», este desaparece tras el horizonte debido a la rotación de la Tierra. La diferencia entre «real» y «aparente» pone como condición un espacio absoluto del que no disponemos.


Nicolás Copérnico (1473-1543)

Como mucho, podemos recurrir al sistema de referencia que nos brinda el fondo cósmico de radiación de microondas. Quien en estas coordenadas no sepa qué dirección tomar se encuentra en reposo en un sentido muy amplio de la expresión. Con respecto a dicho sistema, la Vía Láctea se desplaza a una velocidad de cientos de kilómetros por segundo a través del cosmos, alrededor del centro de la galaxia gira el sistema solar a una velocidad del mismo orden de magnitud y, en él, los planetas orbitan alrededor del Sol. Los terrícolas nos movemos a la nada despreciable velocidad de 30 kilómetros por segundo.

Para poder «explicar» las aceleraciones de objetos celestes habría que esperar al estudio de las causas del movimiento, que llegó sobre todo de la mano de Newton. El ingrediente esencial es la ley de la gravitación. Para poder derivar las trayectorias de los objetos a partir de ella, se requiere determinar sus masas, posiciones relativas y velocidades.

En comparación con otros sistemas de referencia, tales cálculos solo se tornan simples en los sistemas inerciales. En ellos, la cantidad de movimiento de un objeto permanece constante si sobre él no actúa ninguna fuerza; todos los cambios en el momento (aceleraciones) se explican por medio de la ley de la gravitación u otras similares. Ello se debe a que esta ley observa «por sí misma» las leyes de conservación de la cantidad de movimiento y del momento angular. El sistema heliostático de Aristarco de Samos y Copérnico conforma un sistema inercial, al menos si ignoramos que la trayectoria del sistema solar alrededor del centro de la galaxia no es exactamente lineal, y también si se miden las velocidades no con respecto al centro del Sol, sino con respecto al centro de masas de todo el sistema solar.

En el sistema de Tycho Brahe, el objeto de mayor masa (o, de manera más precisa, el centro de gravedad del sistema) describe una trayectoria circular, no así el resto. Desde un punto de vista cinemático, resulta equivalente al sistema heliostático de Copérnico; sin embargo, su dinámica no se deja explicar mediante leyes como la de la gravitación. A pesar de todo, siempre podremos construir un «reloj de planetas» con ruedas dentadas que (en el caso ideal de órbitas circulares) reproduzca con fidelidad el movimiento de todos los astros, con independencia de qué eje decidamos fijar a la pared.

Por *copernicano* entendemos hoy en día no solo la preferencia por los sistemas inerciales frente a otros sistemas de laboratorio igualmente útiles, sino algo más amplio: a saber, el postulado de que nuestra descripción del mundo debe ser lo más universal posible y no debe generalizar de manera simplista las características especiales de nuestro entorno inmediato. De esta forma, apartamos nuestro planeta del centro del universo y lo convertimos en uno más de tantos. Lo mismo ocurre con nuestro sistema solar y toda la galaxia.

Gracias a la espectroscopía, sabemos que las estrellas lejanas contienen los mismos elementos químicos que observamos a nuestro alrededor. Ello supone un apoyo convincente a la perspectiva copernicana, lo que sin duda nos brinda una lección de humildad. Algo que en el campo de la biología comenzó a ocurrir a mediados del siglo XIX, cuando el ser humano se convirtió en un ser vivo más de la naturaleza... si bien el único que puede y debe asombrarse de sí mismo y de todo lo que lo rodea.

HISTORIA

Si Aristarco de Samos (entre 310 y 230 a.C.) situó el Sol en el centro del mundo mucho antes que Copérnico, otro filósofo griego pudo haberse adelantado a Tycho Brahe: Heráclides Póntico (entre 390 y 322 a.C.), uno de los discípulos de Platón.

Heráclides fue uno de los primeros en explicar la trayectoria visible de las estrellas a partir de la rotación diaria de la Tierra. Como para casi todos los pensadores antiguos, a excepción de Aristarco, la Tierra se hallaba en el centro del universo. El Sol y la Luna giraban alrededor de ella.

Según algunas fuentes, Heráclides habría supuesto que, aunque el Sol y los planetas exteriores (desde Marte hasta Saturno) giraban alrededor de la Tierra, los planetas interiores, Mercurio y Venus, orbitarían en torno al Sol.

PARA SABER MÁS

El origen galileano de la cosmología moderna. Matthias Schemmel en *Investigación y Ciencia*, n.º 398, págs. 26-35, noviembre de 2009.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
   Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
   Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
   Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
   Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
   Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
   Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
   El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
   Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
   Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
   La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 10,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos
España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA
España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.

La hiperesfera

La cuarta dimensión y la conjetura de Poincaré

Usted y yo habitamos en un espacio tridimensional. Nos podemos desplazar en tres dimensiones independientes: arriba o abajo, derecha o izquierda, y adelante o atrás. Y eso es todo: cualquier dirección en la que nos movamos puede obtenerse a partir de una combinación de desplazamientos en esas tres dimensiones.

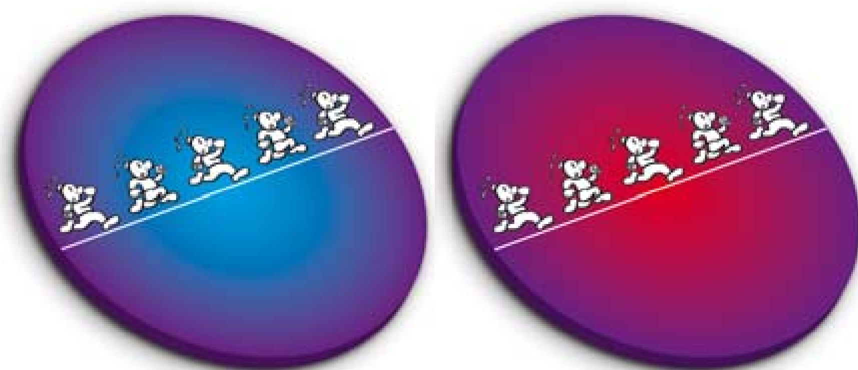
En su obra *Planilandia: Una novela de muchas dimensiones*, Edwin A. Abbott imagina un mundo bidimensional, completamente plano. Por supuesto, también sus habitantes son planos: figuras de grosor cero que solo pueden desplazarse en dos dimensiones (derecha o izquierda y adelante o atrás, pero nunca hacia arriba ni hacia abajo). La vida de los personajes de Abbott difiere en gran medida de la nuestra. Piense, por ejemplo, en un triángulo y un cuadrado. Observados desde arriba —como los veríamos nosotros— parecerían muy distintos entre sí. Pero, entre ellos, solo podrían observarse de perfil, por lo que cada uno vería al otro como una línea.

Si un habitante del mundo de Abbott quisiera encarcelar a otro, bastaría con que lo rodeara con una circunferencia. Para el preso, una circunferencia supondría una barrera impenetrable, ya que bloquearía las dos direcciones posibles de movimiento. Desde nuestro punto de vista, en cambio, la víctima no se encontraría atrapada. Podríamos liberarla levantándola del plano (hacia arriba, en la tercera dimensión) y devolverla a su mundo en algún punto exterior a la circunferencia. Para los habitantes de Planilandia, semejante vía de escape resultaría misteriosísima: les parecería que el preso se desvaneció de la cárcel y reapareció fuera de ella.

Ahora, imagine que usted me encarcela a mí en el interior de una celda esférica. Para mí la esfera resultaría infranqueable, pero no para un ser con acceso a una cuarta dimensión. Este podría rescatarme a través de esa dimensión adicional y volver a depositarme en nuestro espacio tridimensional, en alguna ubicación exterior a la esfera. Para usted, sin embargo, yo me habría esfumado de la celda y me habría materializado fuera de ella.

¿Qué sucedería si una esfera pasase a través del mundo de Abbott? Cuando esta tomase contacto con el plano, sus habitantes verían aparecer un punto de la nada. Después, mientras la esfera continuase su movimiento a través de la tercera dimensión y traspasase el plano, los seres de Planilandia verían cómo el punto se convierte en un círculo. Este aumentaría su tamaño hasta el momento en que la esfera se intersecase con Planilandia a la altura del ecuador. Después, se contraería hasta convertirse en un punto y desaparecer.

Nosotros, que vivimos en tres dimensiones, experimentaríamos un fenómeno similar si nos visitase una *hiperesfera*, el equivalente tetradimensional de una esfera. Cuando la hiperesfera tocase nuestro espacio, veríamos emerger un punto de la nada. Este se transformaría entonces en una esfera, la cual crecería hasta alcanzar un tamaño máximo (correspondiente al «ecuador» de la hiperesfera) y luego se encogería más y más hasta desvanecerse por completo.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

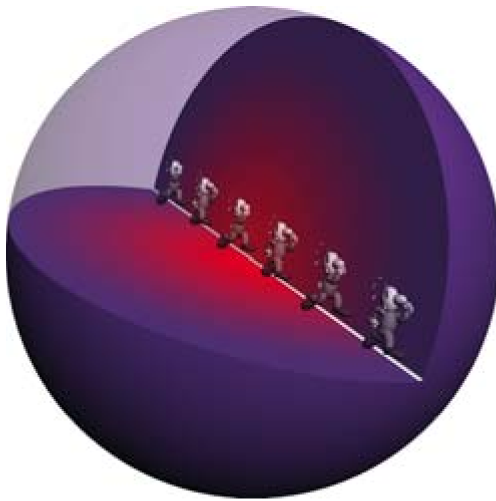
¿Qué es una hiperesfera?

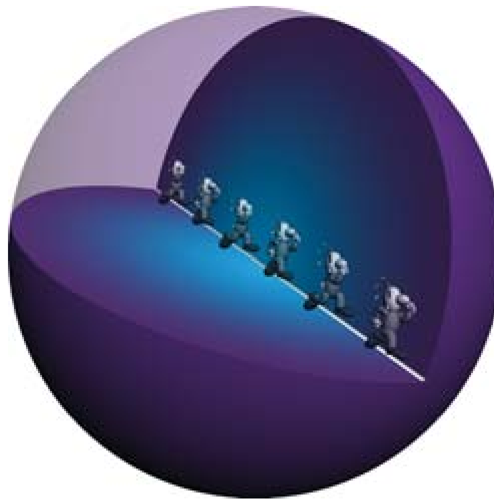
Desde un punto de vista matemático, caracterizar una hiperesfera resulta muy sencillo. Examinemos primero el caso que nos resulta más familiar: en un espacio de tres dimensiones, la *esfera* de radio R centrada en un punto p se corresponde con el conjunto de puntos cuya distancia a p es R. Tenga en cuenta que, aunque la definamos en un espacio tridimensional, una esfera conforma una superficie de dos dimensiones.

Del mismo modo, en dos dimensiones podemos elegir un punto p y considerar el conjunto de todos los puntos pertenecientes a dicho espacio bidimensional que se encuentran a una distancia R de p. La figura (unidimensional) así definida es una *circunferencia*. Resulta inmediato extender esta definición a espacios de dimensión arbitraria. Así, en un espacio tetradimensional, la hiperesfera de radio R centrada en p se define como el conjunto de puntos de dicho espacio cuya distancia a p es R. De nuevo, una hiperesfera constituye un espacio de tres dimensiones a pesar de que la definamos en un espacio tetradimensional.

Si bien parece sencillo caracterizar una hiperesfera, lo que no resulta nada fácil es imaginársela. Arriba hemos discutido lo que experimentaríamos si una hiperesfera atravesase nuestro espacio, pero nos gustaría entenderla un poco mejor.

Un ejercicio útil consiste en preguntarse cómo ayudaría usted a uno de los habitantes de Planilandia a entender las propiedades de una esfera. He aquí un método. Fabrique un cascarón esférico y pinte cada latitud de un color diferente. El polo norte será azul. Conforme la latitud disminuya, el color adquirirá un tinte cada vez más morado, hasta llegar al ecuador. Pasado este, el tono se irá enrojeciendo hasta alcanzar el polo sur, que será completamente rojo. Ahora corte la esfe-





ra por el ecuador, separe ambos hemisferios y aplánelos hasta obtener dos discos. El primero de ellos (el hemisferio norte) tendrá el centro azul y el borde morado. El segundo mostrará el centro rojo y el borde morado.

Ahora, coloque ambos discos sobre Planilandia y permita que sus habitantes los exploren. (Para observar su interior, los seres deberán excavar túneles en los discos e introducirse en ellos.) Una vez que se hayan familiarizado con ellos, puede usted darles la siguiente explicación: «Estos discos proceden de una esfera desarmada y deformada. Para reconstruirla, deben ustedes deformar los discos en la tercera dimensión. Cuanto más azul sea un punto, más habrán de desplazarlo en un sentido a lo largo de la tercera dimensión; cuanto más rojo, más deberán moverlo en el sentido opuesto. Los puntos morados —los bordes de cada disco— permanecerán en su mundo de dos dimensiones. Después, unan ambos bordes. El resultado es una esfera en mi mundo tridimensional».

Un ser tetradimensional podría recurrir a un método análogo para explicarle a usted en qué consiste una hiperesfera. Comenzaría por mostrarle dos bolas tridimensionales, ambas con la superficie de color morado. Al explorar su interior, vería que la primera —a la que su interlocutor denomina «hiperhemisferio hipernorte»— presenta un tono tanto más azulado cuanto más se aproxima usted al centro, el cual sería un punto de color azul. Al examinar la segunda bola —el «hiperhemisferio hipersur»— observaría un interior cada vez más rojizo hasta llegar al centro, perfectamente rojo. El ser tetradimensional le explicaría cómo deformar ambas esferas a lo largo de la cuarta dimensión: en sentidos opuestos y en una cantidad dictada por el color de cada capa. Por último, debería usted unir ambas superficies moradas, las cuales permanecerían en su mundo tridimensional.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

La conjetura de Poincaré

¿Cómo sería la vida en una hiperesfera? Imagine primero un pequeño habitante bidimensional que deambula por una superficie esférica común y corriente. A su alrededor, el espacio exhibe localmente el mismo aspecto que en Planilandia, pues también aquí nuestro amigo puede moverse en dos direcciones independientes. Sin embargo, si comienza a caminar en línea recta, experimentará un curioso fenómeno: acabará regresando al punto del que partió. (En un espacio curvo, una «línea recta» entre dos puntos lo suficientemente cercanos se define como la línea de menor longitud que va de uno a otro sin salirse del espacio correspondiente. Sobre la superficie de una esfera, las líneas rectas son el equivalente a los meridianos y los paralelos.) De la misma manera, si usted se encontrase inmerso en una hiperesfera, al caminar en línea recta en cualquier dirección regresaría, antes o después, al punto de partida.

Ahora imagine que el habitante bidimensional de una esfera posee una cuerda de gran longitud, la cual anuda para formar un lazo contráctil, como el de un vaquero. Al principio, nuestro amigo se encuentra «fuera» del bucle formado por el lazo. Pero si comienza a agrandar el lazo, su creador terminará en una pequeña cárcel circular, rodeado de lo que antes él consideraba el «exterior» del lazo. De igual manera, si el habitante tridimensional de una hiperesfera construyese una esfera elástica y esta comenzase a expandirse, acabaría también en una prisión esférica.

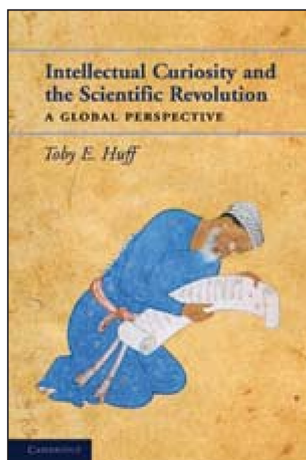
La hiperesfera posee otra propiedad interesante. Imagine que se encuentra usted en un espacio tridimensional cuya geometría desconoce. A primera vista (localmente), ese espacio se asemeja al nuestro. Pero alguien le informa de que se trata de un espacio *cerrado*; es decir, que aunque posee una extensión finita, carece de frontera. (En dos dimensiones, un disco constituye un ejemplo de un espacio finito dotado de frontera —el borde del disco—; la cáscara de una naranja, por el contrario, es un espacio finito carente de frontera.) La hiperesfera es un espacio tridimensional cerrado, por lo que bien podría usted encontrarse inmerso en una hiperesfera. Pero existen otros espacios tridimensionales cerrados: por ejemplo, un *hipertoro* (el análogo tridimensional a la superficie de un dónut). ¿Hay algún experimento que le permita determinar en qué espacio se encuentra?

La *conjetura de Poincaré* afirma que existe un método infalible para salir de dudas. Al igual que antes, consiga una cuerda lo bastante larga y forme con ella un lazo de vaquero. Comience a tirar de la cuerda para contraer el bucle del lazo. Si, con independencia de la posición y la longitud originales del lazo, *siempre* resulta posible tirar de él hasta reducir el tamaño del bucle a cero, puede usted asegurar que vive en una hiperesfera y no en un hipertoro ni en ningún otro espacio tridimensional cerrado que pueda imaginar.

La demostración de este resultado constituye uno de los grandes triunfos de la matemática contemporánea. Henri Poincaré lo postuló como conjetura en 1904, pero su demostración se hizo esperar noventa y nueve años. Fue publicada en 2003 por el matemático ruso Grigori Perelman. Tan difícil se consideraba el problema que el Instituto Matemático Clay lo había incluido entre los siete Problemas del Milenio y había ofrecido un millón de dólares a quien lo resolviese. Perelman declinó el premio. También rechazó la medalla Fields, el más alto honor que un matemático puede recibir.

PARA SABER MÁS

Una excelente introducción a estos temas es **The shape of space**, de Jeffrey R. Weeks (Marcel Dekker, 2002).



INTELLECTUAL CURIOSITY AND THE SCIENTIFIC REVOLUTION. A GLOBAL PERSPECTIVE,

por Toby E. Huff. Cambridge University Press; Cambridge, 2011.

Ciencia occidental

¿Por qué no hubo un desarrollo paralelo en Oriente?

¿Por qué unas sociedades han logrado un desarrollo científico y otras han permanecido rezagadas? La revolución científica constituye un fenómeno occidental. Forjó su primer eslabón en el siglo XVII, con una cascada de descubrimientos que transformaron nuestra visión del mundo. Le habían precedido los viajes de Colón, Vasco de Gama, Américo Vespucio y la circunnavegación de Magallanes, que contaban maravillas infinitas de geografías y personas, de flora y fauna. Durante los siglos XVI y XVII, aparte de las campañas militares españolas, los europeos se presentaron en las plazas comerciales de la India mogol, China y el Imperio otomano. Este último se extendía a lo largo del Mediterráneo, de Estambul a Marruecos; por el norte llegaba a los Balcanes, Hungría y las puertas de Viena.

En Oriente no encontramos contrapartida de Galileo Galilei, Johannes Kepler, René Descartes, Christiaan Huygens o Isaac Newton; ni de William Gilbert, Otto von Guericke o Francis Hauksbee; ni de Evangelista Torricelli, Blaise Pascal, Robert Hooke, Robert Boyle, William Harvey, Marcello Malpighi, Regnier de Graaf, Jan Swammerdam o Antoni Leeuwenhoek. A caballo entre el XVI y el XVII, Gilbert publicó *De magnete*. Sometió a ensayo diversos materiales en busca de carga magnética, intentando descubrir cuándo es más intensa, cuándo se amortigua y cuál es su posible papel en la constitución del mundo. Desarrolló un prototipo de mecanismo de medición de electricidad, el *versorium*, o indicador de carga eléctrica, para detectar cargas magnéticas o eléctricas. En 1608 se inventó el telescopio; pasado un par de años, Galileo descubría los cráteres de la Luna, los satélites de Júpiter y las fases de Venus. Los avances recorrieron la astronomía, la óptica, la nueva ciencia del movimiento y la microscopía; los operados en hidráulica y pneumática, medicina y electricidad impulsaron a Europa hacia fronteras desconocidas.

En su culminación, la síntesis newtoniana integró la mecánica celeste y terrestre en el marco general de la gravitación universal. La curiosidad occidental parecía ilimitada. En cambio, Oriente, privado de ese acicate, se estancó. Los encuentros entre civilizaciones en el siglo XVII no abocaron en una nueva ciencia mundial. Las relaciones que por entonces iniciaba Europa con China, la India mogol y el Imperio otomano no supusieron ningún trasvase de los nuevos conocimientos. Sin subestimar con ello la arquitectura espléndida de la India mogol (Taj Mahal) o el arte de sus miniaturas. La cerámica de la China de los Ming, que rezuma calidad y belleza, o la red hidráulica de China, un acierto de secular persistencia. En Oriente Medio, los turcos otomanos levantaron un imperio que duró casi 600 años. Sus numerosos monumentos arquitectónicos, en especial los diseñados por Sinan, fallecido en 1588, se cuentan entre los más hermosos de su clase. Las creaciones morales de los mogoles, Confucio o la propia historia de Sinan —robado de una escuela cristiana familiar, esclavizado y convertido al islam, y educado en la escuela de palacio— reflejan sistemas extraordinarios de educación.

En el siglo XVII, Occidente cosechaba lo sembrado en centurias precedentes. Las corporaciones, instituciones y universidades, dependientes del papado o del monarca, posibilitaron la emergencia de la ciencia. No parece, sin embargo, que los logros islámicos en matemáticas y astronomía, tan a menudo ponderados, ejercieran influencia directa sobre Copérnico (el supuesto impacto de Nasir al-Din al-Tusi), Tycho Brahe, Galileo, Kepler y Newton. Los inicios de la astronomía occidental establecieron un conjunto de operaciones geométricas con combinaciones de círculos ideadas para realizar predicciones sobre el curso diario, mensual y anual del Sol, la Luna, las estrellas y los planetas. La forma real del cosmos quedó en manos de los filósofos de la naturaleza. Copérnico creía que podía recurrir a la matemática para crear un nuevo modelo de universo, con centro en el Sol. Estaba convencido de que, si un astrónomo comprendía el constructo geométrico levantado, desentrañaría la naturaleza heliocéntrica del universo. Avanzó que sus cálculos no eran solo matemáticos sobre símbolos matemáticos, sino sobre la forma real del mundo en que vivimos. Galileo lo entendió así.

La invención del telescopio, introducido por los jesuitas en Oriente, constituye un buen hilo conductor para mostrar la superioridad científica de Europa. Como el microscopio. Aunque ambos descubrimientos entraron en el dominio musulmán y chino, apenas si motivaron innovación alguna. La tesis del autor no se debilita con la memoria del trabajo medieval de Ibn al-Haytham (nuestro Alhacén) en óptica y Ibn Bajja en ciencia del movimiento. El máximo esplendor del saber islamista, alcanzado entre los siglos X y XII, que tuvo en la trigonometría y la perspectiva su estandarte, no cristalizó en un progreso sostenido. La propia invención del telescopio fue un asunto prolongado que se basó en el soplado del vidrio y el pulimentado de las lentes. Cóncavas y convexas.

Los arqueólogos han encontrado pruebas de manufactura del vidrio de hace 2000 años a.C. en Mesopotamia. Los vidrios producidos por el hombre y las técnicas asociadas se difundieron por Oriente Medio, entre fenicios, egipcios y romanos. En el siglo XIII, la artesanía del vidrio había adquirido en Florencia y Venecia un desarrollo espectacular. Fue por entonces cuando aparecieron las gafas entre los europeos. Los inventores de Pisa y Florencia crearon los primeros modelos.

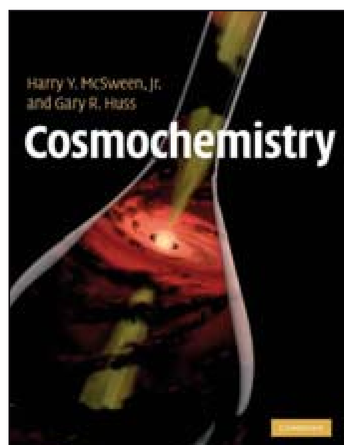
Aunque se debate el momento en que se inventaron las lentes cóncavas, no estuvieron ampliamente disponibles hasta finales del siglo XVI, lo que impidió que el telescopio se inventara mucho antes, aunque existían lentes cóncavas ya en 1450. El telescopio es el instrumento emblemático de la revolución científica, que transformó la práctica de la astronomía en el siglo XVII; convirtió una ciencia tediosa en un campo de investigación activo, con un útil sumamente preciso, para nuevos hallazgos, el más excitante de los cuales lo firmó el da-

nés Ole Romer sobre la velocidad de la luz. Romer había estado observando los satélites de Júpiter, cuando se percató de que el tiempo transcurrido desde la observación de una luna de Júpiter era mayor cuando el planeta se hallaba más alejado de la Tierra. La velocidad de la luz era finita, no instantánea.

Si el telescopio llegó a manos de los estudiosos chinos, otomanos y mogoles, ¿por qué no despertó su interés por lo que pasaba en los cielos y explorarlo? ¿No acertaron a ver implicaciones científicas importantes para la teoría astronómica? ¿Preparaban las madrasas para la investigación científica? En todo el mundo, en los aledaños del 1600, el firmamento nocturno constituía un espectáculo único de estrellas brillantes, antes de que la invención de la electricidad y otras formas de iluminación irrumpieran en un cielo nocturno de maravillosos objetos estrellados que difundían su luz en todas las direcciones. Eso era verdad en Europa y en América del Norte, en India, África y China. El firmamento estaba henchido de estrellas fijas, ancladas en un fondo azul que giraba diariamente alrededor de la Tierra. Sobresalían cinco planetas: Mercurio, Marte, Venus, Júpiter y Saturno. Desde el tiempo de Ptolomeo, en el siglo II d.C., astrónomos y astrólogos habían catalogado ya unas 1028 estrellas, muchas de las cuales agrupadas en pautas antropomórficas denominadas constelaciones (Osa Mayor, Osa Menor, la Liebre, el Toro, la Ballena, etcétera). No todas las estrellas encajaban en esos patrones. Ptolomeo señalaba a menudo otras estrellas cercanas o vecinas de las constelaciones (asterismos).

Entre las causas del retraso oriental se señalan las ideológicas. Pese a las reservas religiosas contra la ciencia, hipertrofiadas en no pocas ocasiones, lo incontrovertible es que no cabe imaginar que un reformador islamista del siglo XVI o XVII clavara sus propuestas secesionistas en las puertas de la Gran Mezquita de Damasco. La anatomía sufría la aversión islamista a la representación del cuerpo humano. China se mostró renuente a la incorporación de la ciencia europea; y cuando aceptó el uso del telescopio lo aplicó acríticamente a la ratificación de viejos mitos cosmológicos. Desde antes del tiempo de Aristóteles en el siglo IV a.C. hasta Galileo, los filósofos occidentales se habían afanado en comprender el movimiento de los proyectiles, las fuerzas que imprimen o impiden dicho movimiento, así como la descripción matemática de la caída y aceleración de los cuerpos. En este sentido, la ciencia es una búsqueda de una explicación fundamental sobre cómo opera la naturaleza. Una vez emergió la ciencia moderna (heliocentrismo y newtonianismo) la matemática se convirtió en una herramienta poderosa, representada en los *Philosophiae naturalis principia matemathica*, de 1687, de Newton.

—Luis Alonso



COSMOCHEMISTRY,

por Harry Y. Mc Sween y Gary Huss. Cambridge University Press; Cambridge, 2010.

Materia espacial

Introducción a la química del cosmos

Este libro ofrece una introducción excelente a la química del cosmos, recomendable para estudiantes así como para aficionados a la astronomía. ¿Qué es la química del cosmos? Según los autores, experimentados investigadores y docentes, corresponde al estudio de la composición química del universo y los procesos (muchas veces nucleares) que han conducido a la misma. Por tanto, trata menos de reacciones químicas —no contiene adrede ecuación química alguna— o de moléculas complejas, que suelen tratarse en astroquímica. McSween y Huss se dedican, con un vivo estilo pedagógico, a temas más cercanos a la física que a las reacciones químicas complejas: la abundancia cósmica de los elementos y de sus isótopos.

En el primer capítulo aparece, como punto de partida histórico, la publicación de una tabla de la abundancia de elementos en meteoritos debida a Victor Goldschmidt. El segundo capítulo ofrece una introducción a los principios de clasificación y las relaciones en las cuales se basan la tabla periódica de los elementos y la tabla de núclidos.

El tercer capítulo, muy informativo, trata de los orígenes astrofísicos de los elementos químicos, o sea de la nucleosíntesis primordial por un lado y de los procesos nucleares en las estrellas por el otro. El cuarto se acerca al tema central de la abundancia media de isótopos y elementos en la nebulosa protosolar.

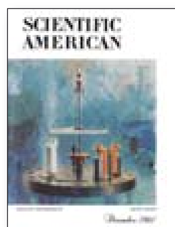
El capítulo número cinco resulta especialmente fascinante. Se centra en los «granos presolares», partículas micrométricas o menores todavía que se originaron antes de la constitución de nuestro sistema planetario dentro del polvo estelar. El hecho que este polvo estelar haya superado la fase temprana caliente de la nebulosa protosolar sin llegar a fundirse y se haya mantenido intacto en las condritas primitivas forma parte de las conclusiones más importantes de la química del cosmos. Ha permitido la existencia de un área de investigación astronómica totalmente nueva que no usa telescopios, sino microscopios electrónicos y microsondas, y que podría denominarse paleontología estelar.

La clasificación actual de los meteoritos, su composición y lo que nos revelan sobre el sistema solar temprano constituyen el tema del sexto capítulo. El libro trata también otros temas: secuencias de condensación de sólidos, isótopos radioactivos como cronómetros, moléculas orgánicas en el sistema solar, química de los cometas, investigación geoquímica de la Luna y de Marte, y modelos de la formación de nuestro sistema solar.

Esta introducción a la química del cosmos procede en su mayor parte sin fórmulas —lo cual habría de traducirse en un aumento del círculo de lectores—. Las figuras, si bien en blanco y negro, son todas instructivas y de alta calidad. A cada capítulo siguen preguntas para evaluar la comprensión, un resumen y una lista con referencias para ampliar conceptos.

—Thomas Posch

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Diciembre 1961

Estructuras proteicas

«Observamos algo que nadie de nosotros había visto antes: una imagen tridimensional de una molécula proteica con toda su complejidad. Se trataba de una representación tosca; al cabo de dos años tuvimos una experiencia casi igual de emocionante, tras dedicar numerosos días a introducir datos en una máquina calculadora rápida para obtener, poco a poco, una imagen más nítida de aquella misma molécula. La proteína correspondía a la mioglobina y la nitidez de aquella nueva imagen nos bastó para deducir la organización espacial de la casi todos sus 2600 átomos.

—John C. Kendrew»

Kendrew compartió el premio Nobel de química de 1962.

Milgram y la conformidad

«Mi objetivo consistía en comprobar si al estudio de las características nacionales podrían aplicarse técnicas experimentales y, en particular, si podría medirse la conformidad en dos países europeos: Noruega y Francia. La conformidad se eligió por varias razones. Primero, solo puede decirse que existe una cultura nacional si todos los individuos se adhieren a unas pautas de conducta comunes; este es el mecanismo psicológico subyacente a todo comportamiento cultural. Segundo, porque la conformidad se ha convertido en un tema candente de gran parte de la crítica social actual; han argüido los críticos que la gente se ha vuelto demasiado sensible a la opinión de los demás, lo que perjudica el desarrollo de una sociedad moderna. Y por último, se dispone de excelentes métodos experimentales para medir la conformidad. —Stanley Milgram»



Diciembre 1911

Una carta presidencial

«Al Director de *Scientific American*: Hasta que al mundo se le hayan garantizado unos medios pacíficos para zanjar las disputas internacionales, la prudencia y el patriotismo demandan que Estados Unidos mantengan una armada acorde con su riqueza y dignidad. —Wm. H. Taft, Comandante en Jefe de la Armada de EE.UU.»

Publicada en el número especial sobre la Armada.

Observaciones gnatológicas

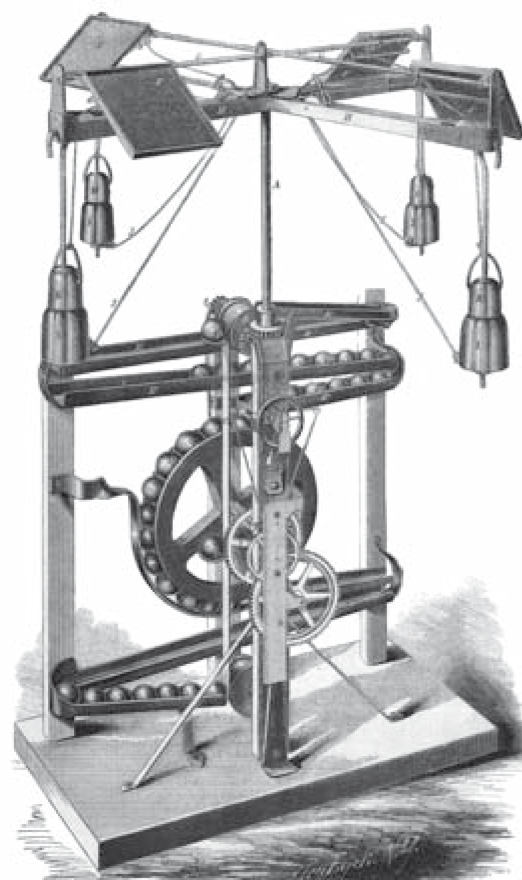
«Para determinar la fuerza media de las mandíbulas, el doctor G. E. Black, presidente de la Universidad Dental de Chicago, ideó un instrumento de diseño muy sencillo, pero con un nombre que pondría a prueba cualquier mandíbula normal: el gnatodinamómetro. Con ese instrumento midió la fuerza del mordisco de un millar de personas. En promedio demostraron una fuerza de 78 kilos en los molares, que resultó mucho menor en los bicúspides e incisivos. La lista de participantes incluye hombres y mujeres de toda clase, desde un herrero hasta un lavandero chino.»



Diciembre 1861

Un viento poderoso

«Una de las grandes fuerzas naturales de las que dispone la humanidad, sin costo alguno y en cantidad ilimitada, representa la energía eólica. Numerosos esfuerzos se han destinado a obtener de este recurso una energía estable, mediante la acumulación del sobrante cuando el viento fuera intenso. Uno de los ejemplos más recientes y sencillos de ello se ilustra en el grabado adjunto. Consiste en un molino de viento que hace subir una serie de bolas de hierro; a continuación, estas se dejan caer, de una en una, sobre los cangilones de una noria. Como consecuencia, la noria gira y acciona a su vez la máquina.»



Aprovechar el viento, según un invento ilustrado por el ingeniero y dibujante Rube Golderg en 1861. Las bolas de hierro que usaba la máquina producirían un horrible estruendo.

Patentes

«Según las repetidas consultas recibidas acerca de quién es el dueño legítimo de inventos realizados en circunstancias diversas, algunas notas informativas de este apartado interesarán al menos a nuestros lectores inventores. En lo que respecta a los inventos efectuados por esclavos, la Oficina de Patentes ha rechazado tales solicitudes, pues se los considera legalmente incompetentes lo mismo para recibir una patente que para transferir su interés a otros. Con referencia a los hombres de color libres, los creemos igualmente incompetentes para recibir una patente, pues bajo la legislación de Estados Unidos no se consideran ciudadanos y, por tanto, no pueden defender una patente frente a los infractores en los tribunales del país.»

La decisión Dred Scott de 1857 que legalizaba esa situación fue anulada por las enmiendas decimotercera, decimocuarta y decimoquinta a la Constitución de EE.UU.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. V, N.º 25; 21 DE DICIEMBRE DE 1861





ARQUEOLOGÍA

Los primeros americanos

Heather Pringle

Se ha descubierto que los humanos colonizaron el Nuevo Mundo mucho antes de lo que se pensaba. El hallazgo obliga a replantear las ideas establecidas sobre estos pioneros.

PLANETAS

Excavando en Marte

Peter H. Smith

La misión Mars Phoenix ha reavivado la esperanza de que el planeta rojo pudiera ser habitable.

ENERGÍA

Riesgos de la fractura hidráulica

Chris Mooney

Fracturar una sola vez una capa de esquisto profunda para liberar gas natural podría suponer un riesgo escaso para el abastecimiento de agua potable, pero hacerlo de forma repetida resultaría problemático.



SOSTENIBILIDAD

¿Se puede alimentar a la humanidad sin degradar el planeta?

Jonathan A. Foley

Un plan global articulado en torno a cinco ejes podría duplicar la producción de alimentos y aliviar las agresiones al medio.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS
Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER
MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos: 6,00 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Yago Ascasibar: *El lado oscuro de la Vía Láctea*; Luis Bou: *2011, año internacional de la química, El olor del pensamiento, Madre con escuela, bebé con vida* y *Foro científico*; Fabio Teixidó: *Riqueza mineral de Afganistán* y *Un héroe de mayor gloria*; Juan Manuel González Mañas: *Vacunas para tratar el cáncer* y *Medir la salud celular*; Alberto Ramos: *A la espera del Higgs*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; Tanja Sachse: *Libros*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España